

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes D'INGENIEUR D'ETAT

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : MACHINES ELECTRIQUES

Présenté par
Sadek SIAGHI

Thème

Mesure de la température dans une encoche statorique d'une machine asynchrone à cage

Promotion 2014/2015

Mémoire soutenu publiquement devant le jury composé de :

M Mohand Tahar BELASSEL

MCA, UMMTO, Président

M Rabah KHALDI

MACA, UMMTO, Rapporteur

M Youcef BOTOURA

MCA, UMMTO, Examineur

M Abdelghani KIMOUCHE

MACA, UMMTO, Examineur

Sommaire	
INTRODUCTION GENERALE	01

CHAPITRE I : généralités sur les pertes dans une machine asynchrone.

I-1 : Introduction	02
I-2 : Pertes dans le circuit électrique	02
I-3 : Pertes dans le circuit magnétique	02
I-3-1 : Pertes par hystérésis	03
I-3-2 : Pertes par courant de Foucault	03
I-4 : Pertes mécaniques	03
I-4-2 : Pertes par frottement	03
I-4-3 : Pertes par ventilation	04
I-5 : Pertes supplémentaires	04
I-6 : conclusion	05

CHAPITRE II : modes de transfert de chaleur et méthodes d'étude thermique.

II-1 Introduction	07
II-2 Transfert de chaleur par conduction	07
II-2-1 La conductivité thermique	08
II-2-2 Conductivité thermique des solides hétérogènes	08
II-2-3-1 Association parallèle	10
II-2-3-2 Association série	11
II-3 Transfert de chaleur par convection	11
II-3-1 Convection naturelle et convection forcée	12
II-4 Transfert de chaleur par rayonnement	12
II-5 Echange thermique dans une machine électrique	13
II-6 Méthode d'étude thermique	15
II-6-1 Méthodes expérimentales	15
II-6-1-1 Méthode calorimétrique	15
II-6-1-2 Mesure de température par des capteurs	16
II-6-1-3 Par camera infrarouge	17
II-6-2 Méthodes théoriques	17
II-6-2-1 Méthode nodale	17
II-6-2-2 Méthodes numériques	19
II-6-2-2-1 Méthode des différences finies	19
II-6-2-2-2 Méthode des éléments finis	20
II-7 Conclusion	20

CHAPITRE III : moyens de mesure de température dans une machine électrique.

III-1 Introduction	22
III-2 Méthode de mesure de température par contact directe	22
III-2-1 Les thermocouples	22
III-2-1-1 La température de référence d'un thermocouple	24
III-2-1-2 Différents types de thermocouples	25
III-2-1-3 Avantages et inconvénients des thermocouples	26
III-2-2 Les thermistances	27

III-2-2-1 Constitution et principe	27
III-2-2-2 Avantages et inconvénients.....	28
III-2-3 Comparaison entre thermocouples et thermistances	29
III-3 Méthode de mesure de température sans contact	30
III-3-1 Pyrométrie optique	30
III-3-3 Principe physique	31
III-3-3 Applications	31
III-3-4 Caméra thermique	32
III-3-5 Avantages et inconvénients de la caméra thermique	32
III-1 Conclusion	33

CHAPITRE IV : mesure expérimentale de la température en différents points d'une encoche statorique

IV-1 Introduction.....	34
IV-2 Présentation de la machine a étudié.....	35
IV-3 Présentation du stator d'essai.....	35
IV-4 Description du banc d'essai :.....	36
IV-5 Emplacements des thermocouples dans la machine asynchrone	37
IV-6 Mesures préliminaires	37
IV-6-1 Etalonnage des thermocouples	38
IV-6-1-1 Présentation et principe de l'essai	38
IV-6-1-2 observations	39
IV-6-2 Mesure de la température des têtes de bobine de la machine à l'arrêt.....	40
IV-6-2-1 Le choix de la bobine	40
IV-6-2-2 Présentation du montage et principe de l'essai.....	40
IV-6-2-3 observations et interprétations.	42
IV-7 Etude expérimentale de la température dans une encoche statorique.....	42
IV-7-1 Présentation du montage	42
IV-8 Observations et interprétation des résultats.....	45
IV-9 Comparaison entre les résultats de l'essai de la machine à l'arrêt et ceux du stator.....	46
IV-10 Mesure de la température par une camera infrarouge.	47
IV-11 Conclusion.....	49
CONCLUSION GENERALE.....	50
BIBLIOGRAPHIE.....	51

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

La machine asynchrone, connue également sous le terme anglo-saxon de machine à induction, est une machine électrique à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor. Les machines possédant un rotor « à cage » sont aussi connues sous le nom de machines à cage d'écureuil. Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de rotation du rotor de ces machines n'est pas exactement déterminé par la fréquence des courants qui traversent leur stator.

Bien que les machines asynchrones soient de construction très robuste, elles fonctionnent aussi de plus en plus près de leurs limites thermiques. De ce fait, il peut en résulter une dégradation des parties de la machine.

L'étude de comportement thermique de la machine asynchrone a de tout temps constitué une préoccupation majeure tant pour les constructeurs que pour les utilisateurs. Pour cela l'étude de comportement thermique et la connaissance de la température en tous points de la machine, devient indispensable.

La méthode la plus prometteuse pour la détermination et l'analyse de l'échauffement de la machine asynchrone est la modélisation thermique. Du fait de la très forte hétérogénéité thermique de la machine, l'utilisation d'un modèle thermique théorique basé sur des hypothèses simplificatrices, limitent la précision des résultats. Pour cette raison, une étude expérimentale du comportement thermique de la machine reste indispensable.

Le présent travail est consacré à l'étude expérimentale de l'échauffement dans l'encoche statorique d'une machine asynchrone à cage. A cet effet un dispositif expérimental est utilisé pour mesurer la température au niveau du l'encoche statorique.

Un stator cru est équipé de deux capteurs dans l'encoche et un autre sur la tête de la bobine, et aussi pour les mesures surfaciques on a opté pour la caméra thermique. Et cela donne ainsi d'avantage l'information sur la distribution de la température dans l'encoche.

Pour cela nous avons subdivisé notre travail en quatre chapitres :

- ✓ Généralités sur les pertes dans une machine asynchrone.
- ✓ Mode de transfert de chaleur et méthodes d'étude thermique.
- ✓ Moyens de mesure de température dans une machine électrique.
- ✓ Mesure expérimentale de la température de différents points d'une encoche statorique.

Nous terminons par une conclusion générale.

CHAPITRE I
GENERALITES SUR LES PERTES DANS UNE
MACHINE ASYNCHRONE

I-1 Introduction :

Lors de la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique (cas d'un moteur) ou de l'énergie mécanique en énergie électrique (cas d'une génératrice), une partie de cette énergie est perdue. Celle-ci se manifeste sous forme de chaleur dans les différentes parties de la machine

Les causes des pertes dans les machines tournantes en général, et dans les machines à induction en particulier sont assez complexes, ces pertes peuvent être divisées en trois grands groupes :

- pertes dans les circuits électriques

Enroulement du stator ; du rotor ; et plus généralement, dans toutes les parties conductrices d'une machine traversée par des courants électriques.

- Pertes dans le circuit magnétique

Communément appelées pertes fer : par hystérésis et par courant de Foucault.

- Pertes mécaniques

(Pertes par frottements dans les roulements et pertes par ventilation).

Les pertes qui correspondent aux phénomènes parasites (courant et flux de fuite à fréquence fondamentale ou courant et flux de fuite à fréquence harmonique) sont appelées pertes supplémentaires [1].

I-2 Les pertes dans le circuit électrique :

Ce sont les pertes par effet joule dans toutes les parties conductrices d'une machine parcourue par des courants (enroulement statorique et cage rotorique). Elles peuvent être obtenues précisément par des calculs théoriques on connaissant la résistance **R** parcourue par un courant de la valeur efficace **I**. En triphasé ces pertes s'exprime par :

$$P_{js} = 3RI^2 \dots \dots (w) \quad (I-1)$$

I-3 Les pertes dans le circuit magnétique :

Elles sont appelées aussi pertes fer du fait que les matériaux utilisés sont habituellement à base de fer ; elles regroupent les pertes par hystérésis et les pertes par courant de Foucault [2].

I-3-1 Pertes par hystérésis :

Les pertes par hystérésis résultent de transformation de l'organisation de la matière sous l'effet de la variation en intensité et / ou en direction du champ magnétique appliqué.

Elles sont proportionnelles à la fréquence et à l'amplitude **B_m** de l'induction.

$$P_h = e \cdot K_1 \cdot f \cdot B_m^2 \quad [W/Kg] \quad (I-2)$$

I-3-2 Pertes par courant de Foucault :

Les pertes par courant de Foucault résultent des variations temporelles des flux qui induisent des f-e-m dans leur masse, ces f-e-m donnent naissance à des courants qui se ferment dans la masse de fer [3].

$$P_f = K_2 (e \cdot f \cdot B_m)^2 \quad [\text{W/Kg}] \quad (\text{I-3})$$

Où :

K_1, K_2 sont des constantes :

f : la fréquence du réseau [Hz]

B_m : induction maximale dans l'entrefer [T]

e : épaisseur de tôles [mm]

Généralement le moyen le plus utile pour diminuer ces pertes dans la masse du fer, un circuit magnétique feuilleté.

Dans les machines électriques, les circuits magnétiques sont faits de tôles empilées, isolées électriquement les une des autres à masse égale, les pertes sont proportionnelles au carré de l'épaisseur des tôles.

I-4 Pertes mécaniques :

Elles sont constituées de pertes par frottement et par ventilation.

I-4-1 Pertes par frottement dans les roulements :

Ces pertes sont dues aux contacts des corps roulants, aux mouvements du lubrifiant et du fluide, et des joints intégrés aux roulements.

Ces frottements dépendent de nombreux facteurs à savoir : la charge appliquée sur le roulement, type de lubrification (graisse, injection d'huile), viscosité et type géométrique du roulement [4].

I-4-2 Pertes par ventilation :

On appelle pertes par ventilation la puissance absorbée par le ventilateur monté au bout de l'arbre de la machine qui est utilisé pour le refroidissement de la machine

En réalité, il n'est pas possible de séparer les pertes par frottement et par ventilation dans une machine, car elles sont toutes deux associées à la rotation.

Cependant en basse vitesse, les pertes par ventilation dues à la rotation sont faibles et les pertes par frottement sont estimées.

Les pertes mécaniques peuvent être globalement exprimées par la relation suivante :

$$P_{mec} = K_T \left(\frac{n}{10} \right)^2 De \quad (I-4)$$

Avec :

$K_T = 1,3(1-De)$ pour $0,1 \leq De \leq 0,5m$

De = diamètre extérieur du stator

N = vitesse de rotation synchrone [trs/min]

I-5 Pertes supplémentaires :

Ce sont des pertes dues à tous les phénomènes parasites, en particulier ceux qui correspondent aux flux de fuite, à la fréquence fondamentale et harmonique.

• Pertes supplémentaires à fréquence fondamentale.

Ce sont des pertes créées par les différents flux de fuite existant dans la machine.

Elles sont approximativement proportionnelles au carré du courant statorique [5].

✓ Flux de fuite d'encoches :

Il crée des pertes par effet pelliculaires dans les conducteurs du stator et dans la cage du rotor. Pour les moteurs de faible puissance, ces pertes sont négligeables.

✓ Flux de fuite des têtes de bobines :

Il crée des pertes d'extrémités par induction dans les tôles de capotage, les flasques et autres parties métalliques, ainsi que des pertes dans le cuivre des conducteurs statorique et dans les anneaux du rotor.

✓ Flux de fuite d'inclinaisons des encoches :

L'inclinaison des encoches du rotor a pour effet le déphasage dans l'espace des forces magnétomotrices du stator et du rotor, mais elles introduisent en même temps des pertes entre les barres et le fer rotorique, dues aux différences de potentiel (d.d.p) harmoniques qui apparaissent entre les barreaux.

- **Pertes supplémentaires à fréquence harmonique :**

Ce sont des pertes fer supplémentaires, dues essentiellement à deux causes :

Les variations de la perméance de l'entrefer et la déformation de la force magnétomotrice.

Nous avons schématisé toutes les pertes suscitées dans la figure **II-1**

I-6 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes pertes qui se produisent dans une machine asynchrone, lors de son fonctionnement.

Ces pertes se manifestes sous forme d'une énergie calorifique qui se propage entre les différentes parties active de la machine puis vers le milieu extérieur.

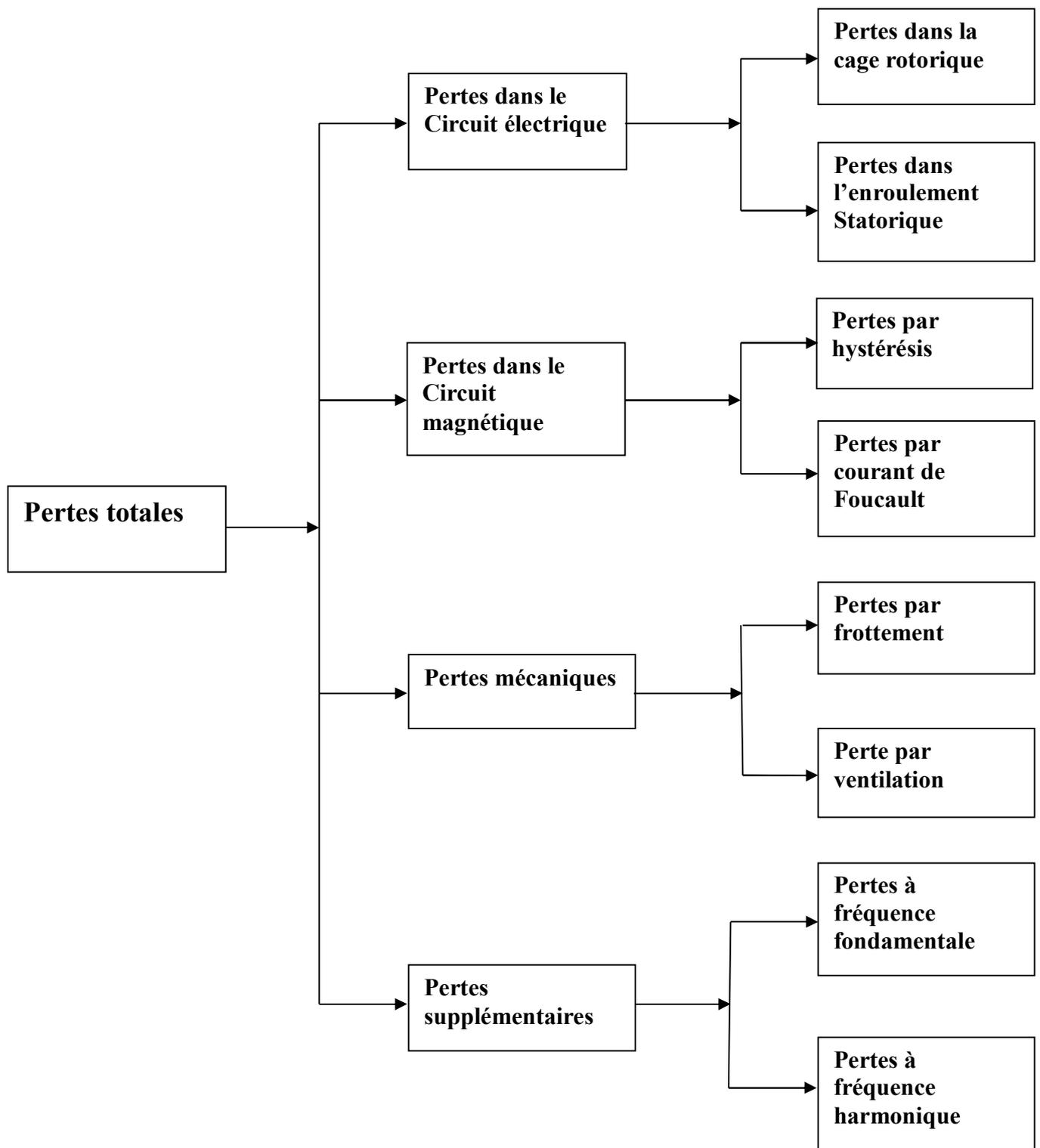


Figure II-1 : Différentes pertes dans un moteur asynchrone.

CHAPITRE II :
MODES DE TRANSFERT DE CHALEUR ET
METHODES D'ETUDE THERMIQUE

II-1 Introduction.

La conversion de l'énergie électromagnétique dans les machines électriques s'accompagne de pertes (électromagnétiques et mécaniques) qui se transforment en énergie calorifique. Ceci se traduit par des élévations de température à l'intérieure de la machine. Le transfert se fait essentiellement par conduction thermique des parties actives internes vers le milieu ambiant où la chaleur est cédée par convection et rayonnement.

Dans ce chapitre, nous commençons par donner une brève description des divers modes de transmission de la chaleur (conduction, convection et rayonnement) ainsi que les lois qui les régissent.

II-2 Transfert de chaleur par conduction :

La conduction thermique est une transmission provoquée par la différence de température entre deux régions d'un milieu en contact physique [6].

Il n'y a pas de déplacement appréciable des atomes ou molécules.

Selon la loi de Fourier, la densité de flux de chaleur est proportionnelle :

- À l'opposé du gradient de température ;
- À la conductivité thermique λ dépendant de la température, dont l'ordre de grandeur varie suivant la nature du corps.

Pour un milieu isotrope et homogène, la densité de flux de chaleur s'écrira alors sous la forme :

$$\vec{\varphi} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}} \theta \quad (\text{II-1})$$

Avec :

$\vec{\varphi}$: Densité de flux thermique [W/m²]

θ : Température [°C]

λ : conductivité thermique [W/m°C]

$\overrightarrow{\text{grad}} \theta = \frac{d\theta}{dx}$ C'est le gradient de température au point x considéré, c'est-à-dire la variation de la température par unité dans la direction x.

II-2-1 Conductivité thermique :

La conductivité thermique λ est une propriété physico-chimique de la matière que l'on appelle aussi le coefficient de conduction thermique [4].

Dans de nombreux cas pratiques, lorsque les écarts de température ne sont pas trop élevés, on peut considérer avec une précision suffisante λ comme une constante pour un milieu donné.

La conductivité est généralement exprimée par un tenseur à trois composantes. C'est le cas des matériaux anisotrope comme les empilages des tôles [7].

Compte tenu de la loi de Fourier, on peut définir la conductivité thermique par la relation qui permet de saisir sa signification physique :

$$\lambda = \frac{|\vec{\phi}|}{\text{grad } \theta} \dots [W / m k] \quad (\text{II-2})$$

Elle représente donc de point de vue numérique l'énergie – chaleur transférée par unité de surface isotherme, dans une unité de temps sous un gradient de température unitaire.

II-2-2 Conductivité thermique des solides hétérogènes :

Pour déterminer la conductivité thermique des solides hétérogènes, on utilise la notion de la conduction à travers un matériau de conductivité λ , d'épaisseur (e) et de section (s) dans la direction de la conduction et dans les faces externes sont respectivement aux température T_1 et T_2

Pour T_1 et T_2 la chaleur s'écoule de la surface (1) vers la surface (2).

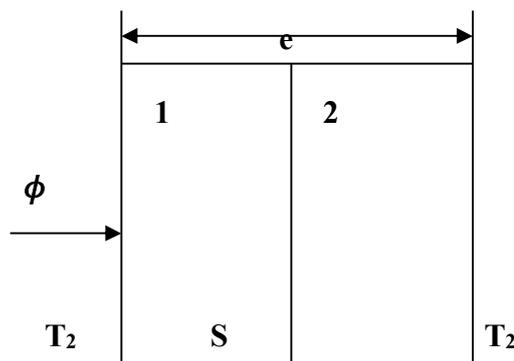


Fig II-1 : transmission de chaleur par conduction

La quantité de chaleur transmise par conduction entre les deux surfaces est donnée par la loi fourrier suivante :

$$\phi = \frac{\lambda \cdot S}{e} (T_1 - T_2) \quad (\text{II-3})$$

Avec :

ϕ : flux d'énergie transmise

S : surface à travers laquelle se propage le flux thermique

e : distance entre deux surfaces dont la température est T_1 et T_2

λ : conductivité thermique

D'où :

$$T_1 - T_2 = \frac{e \cdot \phi}{\lambda S} \quad (\text{II-4})$$

D'après cette relation on peut déduire l'expression de la résistance thermique, par analogie avec la loi d'Ohm.

$$R = \frac{e}{\lambda S} = \frac{T_1 - T_2}{\phi} \quad (\text{II-5})$$

Remarque : On peut généraliser cette notion au cas de milieu de formes différentes, alors on peut écrire :

$$R = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{e}{S_{\text{moy}}} \quad (\text{II-6})$$

• **Cas d'un cylindre :**

$$S_{\text{moy}} = \frac{S_2 - S_1}{\log\left(\frac{S_2}{S_1}\right)} \quad (\text{II-7})$$

S_{moy} : est la moyenne logarithmique des surfaces (1) et (2) interne et externe de cylindre

• **Cas d'une sphère :**

$$S_{\text{moy}} = \sqrt{S_1 \cdot S_2} \quad (\text{II-8})$$

S_{moy} : est la moyenne géométrique des surfaces internes et externes.

Si on a plusieurs couches (i) de milieux différents mais de formes semblables traversés par un flux de chaleur, on peut distinguer deux cas :

II-2-3-1 Association parallèle :

Lorsque le flux de chaleur circule parallèlement aux différentes couches (i) la conductivité est déduite de la relation suivante :

$$\lambda_{eq} \cdot \frac{S_{moy}}{e} = \sum_i \lambda_i \cdot \frac{(S_i)_{moy}}{e_i} \quad (\text{II-9})$$

S_{moy} : Dans le cas des géométries différentes. S est remplacé par S_{moy}

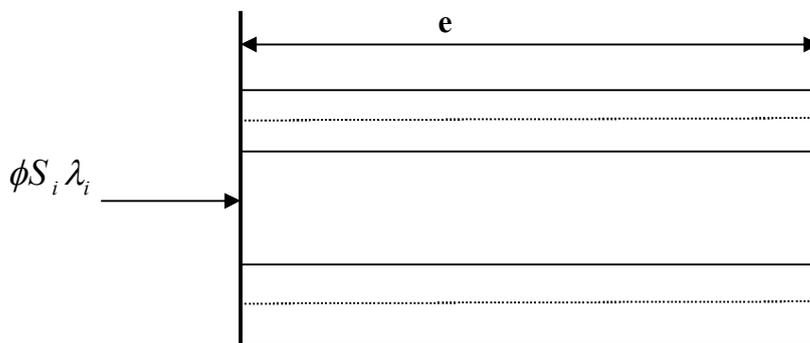


Fig II-2 : association parallèle.

II-2-3-2 Association série :

La conduction équivalente se déduit de la suivante : $\lambda_{eq} S_{moy}$

$$\frac{1}{\lambda_{eq}} \cdot \frac{e}{S_{moy}} = \sum_i \frac{e_i}{\lambda_i (S_i)_{moy}} \quad (\text{II-10})$$

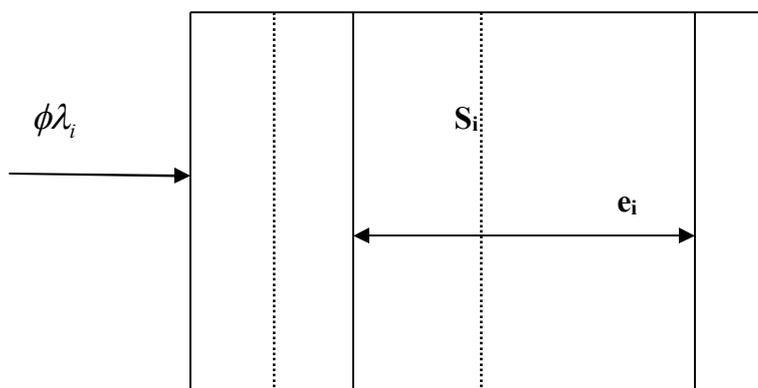


Fig II-3 : association série

II-3 Transfert de chaleur par convection :

Le transfert de chaleur par convection thermique, ou simplement la convection, représente les processus de transport effectué par le mouvement des fluides avec déplacement de la matière. Autrement dit, la convection est l'échange de l'énergie, sous forme de chaleur, entre un fluide en mouvement et la surface d'un corps ayant une température différente ou entre des parties différentes d'un fluide en mouvement qui n'ont pas la même température [8].

La loi de Newton permet de relier la densité de flux de chaleur ϕ à la différence de température entre les deux milieux par la relation suivante :

$$\phi = h(T_f - T_s) \quad (\text{II-11})$$

T_f : Température moyenne de fluide

T_s : Température moyenne de solide

h : Coefficient d'échange convectif [$\text{w/m}^2\text{c}$]

On peut considérer deux types de convection, en fonction des causes qui produisent le mouvement des fluides :

- La convection forcée
- La convection libre ou naturelle

II-3-1 Convection naturelle et convection forcée :

La convection naturelle : le fluide est mis en mouvement sous le seul effet des différences de masse volumique résultant des différences de températures sur les frontières et de champ de force extérieur (la pesanteur) [4].

La convection forcée : le mouvement de fluide est induit par une cause indépendante de différence de température (pompe ; ventilateur...etc.) l'étude du transfert de chaleur par **convection** permet de déterminer les échanges de chaleur se produisant entre un fluide et une paroi [4].

Remarque : un coefficient d'échange thermique élevé permet un bon transfert de chaleur entre le solide et le fluide.

Notons que le coefficient d'échange h peut dépendre de plusieurs paramètres :

La géométrie, la température, la vitesse, les propriétés de fluide (conductivité ; chaleur spécifique ; viscosité)...etc.

II-4 Transfert de chaleur par rayonnement :

Le phénomène de rayonnement thermique constitue une forme particulière de transfert thermique dans lequel le porteur d'énergie n'est plus représenté par des particules de substance, mais par des ondes électromagnétiques ayant pour l'origine l'agitation atomique à la surface d'un corps.

Le mécanisme de rayonnement est créée par l'émission et l'absorption des ondes électromagnétiques porteuses d'énergie rayonnante et par la transformation de celle-ci en chaleur avec le changement d'état énergétique –énergie interne- des corps qui la retiennent [8].

Les échanges thermiques par rayonnement peuvent avoir lieu lorsque les corps sont séparés par le vide ou n'importe quel milieu intermédiaire suffisamment transparent pour les ondes électromagnétique [9].

Conformément à la loi de Stefan-Boltzmann le flux de chaleur échangé de par le rayonnement entre deux corps de température T1 et T2, s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{dQ}{dT} = \varepsilon_{12} \cdot \sigma S (T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{II-12})$$

ε_{12} : est un nombre sans dimension appelé le facteur de forme, il fait intervenir la géométrie considérée que les émissivités des deux corps.

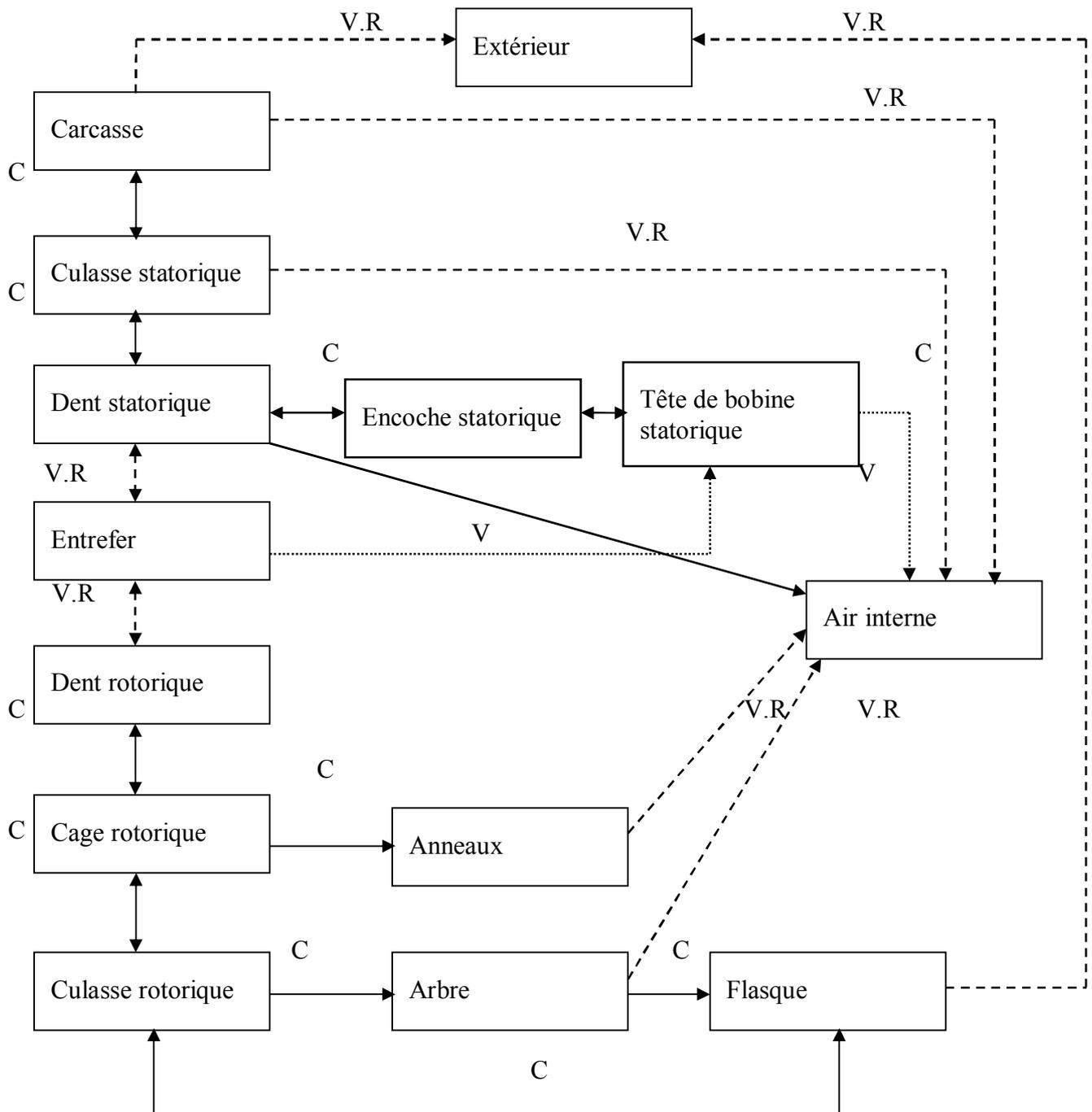
σ : est la constante de Stephan-Boltzmann.

II-5 Echange thermique dans une machine électrique :

Une machine électrique présente une très forte hétérogénéité thermique conséquence des propriétés de différents matériaux (divers isolants et conducteurs, présence de l'air etc...) qui la constitue [4].

La fig. II-4 montre les trois modes de transfert de chaleur habituels dans une machine électrique : la conduction, la convection et le rayonnement, mais à des proportions différents selon le cas. Vu que la majorité des sources de chaleur se trouvent au sein des matériaux, la conduction prédomine malgré l'existence de certains matériaux mauvais conducteurs de chaleur.

La convection se rencontre surtout sur les extrémités, dans l'entre fer et l'extérieure de la machine. Enfin le rayonnement est présent dans toute la partie du moteur. Mais, on tient à faire remarquer qu'en raison des températures relativement basses, la contribution d'échange radiatif est très mineure [1].



C : conduction V : convection R : rayonnement

Fig. II-4 carte générale d'échange thermique d'un moteur asynchrone à cage.

II-6 Méthodes d'étude thermique :

Le domaine d'étude thermique des actionneurs électromécaniques s'appuie sur deux axes principaux :

Le premier est basé sur des maquettes pour déterminer la distribution de la température dans les machines électriques expérimentalement.

Le deuxième axe concerne la modélisation théorique. Nous distinguons deux techniques :

- La méthode nodale ;
- Les méthodes numériques ;

II-6-1 Méthodes expérimentales :

La méthode expérimentale est l'une des méthodes les plus anciennes et toujours d'actualité, qui reste indispensable pour valider les résultats du modèle théorique.

Plusieurs approches qui en adopter cette méthode utilisent les différents appareils et capteurs de mesure selon l'utilité et les conditions de fonctionnement. Parmi ces méthodes on cite :

II-6-1-1 Méthode calorimétrique : [4]

Cette méthode permet de déterminer les pertes d'une machine électrique. Elle consiste en une infrastructure lourde car il faut mettre cette machine dans une enceinte isolée et mesurer l'énergie calorifique fournis par le système de refroidissement.

Le schéma d'une telle réalisation est présenté sur la Fig-II-5

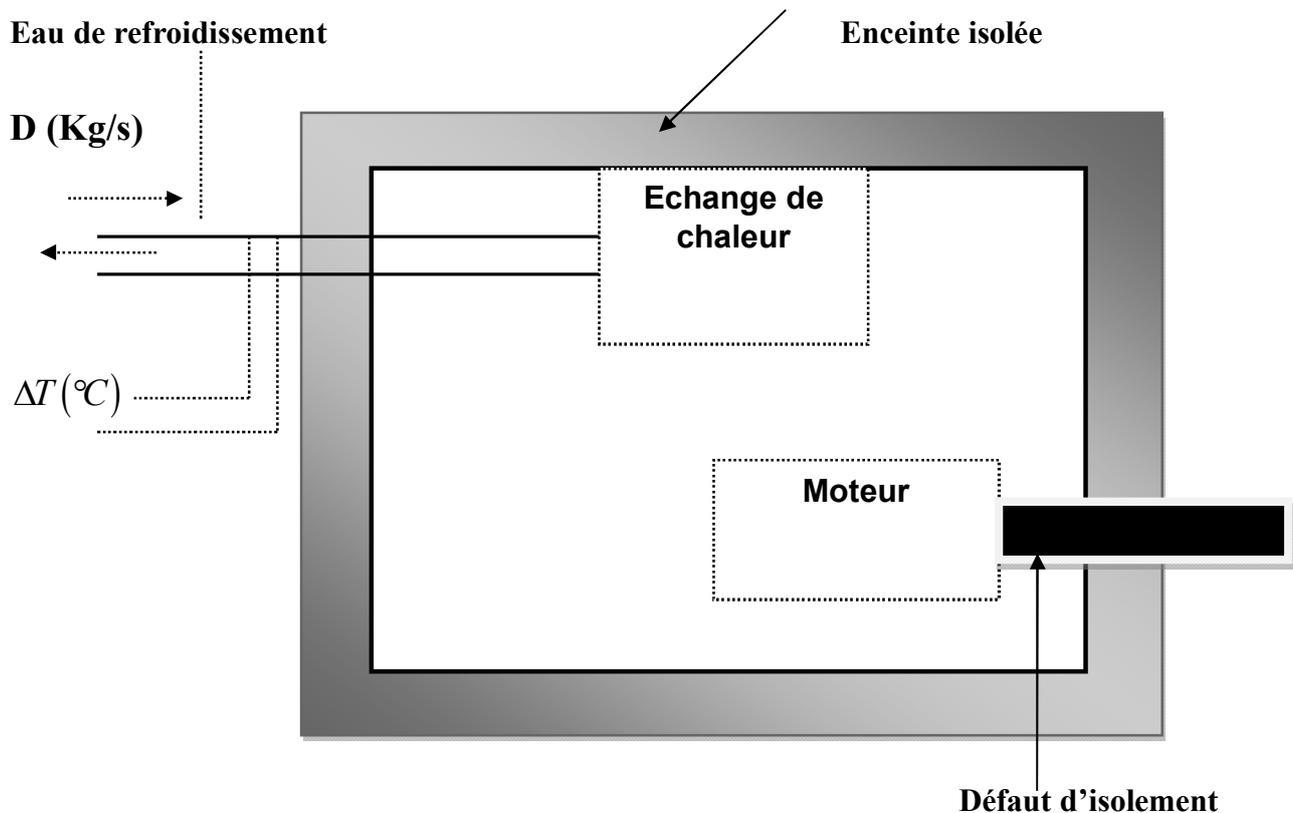


Fig-II-5 : dispositif de mesure calorimétrique.

Cette méthode est très lente, requiert l'utilisation de moyens de mesure très précis. Les Difficultés liées à l'utilisation de cette méthode calorimétrique sont de trois types :

- Imprécision des appareils de mesure ;
- Existence de pertes de chaleur aux parois de l'enceinte qui emmagasine de l'énergie calorifique ;
- Fuite de chaleur au contact arbre-paroi (défaut d'isolement)

II-6-1-2 Mesures de température par des capteurs : [7]

Ces mesures consistent à placer des capteurs de température en différents endroits de la machine. Les capteurs les plus utilisés étant les thermocouples et thermistances.

L'utilisation d'une telle démarche expérimentale présente des difficultés liées au problème de mise en place des capteurs particulièrement dans la partie interne de la machine (entrefer, bar rotorique).

II-6-1-3 Mesure de température par caméra infrarouge :

La caméra thermique est l'un des équipements nécessaires à la thermographie infrarouge. Celle-ci consiste à détecter des tendances thermiques ou variations de température dans les objets sans contact. Ce type de mesure sans contact permet d'éliminer l'influence du capteur.

Toutefois, il reste réservé pour le seul cas où la surface est totalement observable [10].

II-6-2 Méthodes théoriques :

II-6-2-2 Méthode nodale :

La méthode nodale est une méthode largement utilisée dans ce type de travail. Son principe consiste à ramener l'étude du comportement thermique à un schéma équivalent en utilisant les notions de résistance et de capacités thermiques. Les pertes constituent alors le courant électrique est représenté par un flux thermique. Les potentiels en différents nœuds donnent les températures. Nous rappelons sur le tableau (II-1) l'analogie thermoélectrique. [4]

Grandeurs thermiques	Grandeurs électriques
Puissance calorifique	Courant électrique
Température	Tension
Conductance thermique	Conductance électrique
Capacité thermique	Capacité électrique

Tableau II-1 : analogie thermoélectrique.

L'utilisation de ces méthodes impose la définition d'un paramètre commun dans les régions solide et fluide. La description des grandes étapes de la réalisation de cette modélisation est la suivante.

Découpage de la machine en blocs élémentaires (bobinage statorique, fer statorique et fer rotorique).

Une autre approximation, plus performante divise la machine en cinq parties comme présenté par la (Fig-2-6), chaque élément étant identifié par un nœud dans le réseau thermique avec sa capacité thermique et la source de chaleur correspondante.

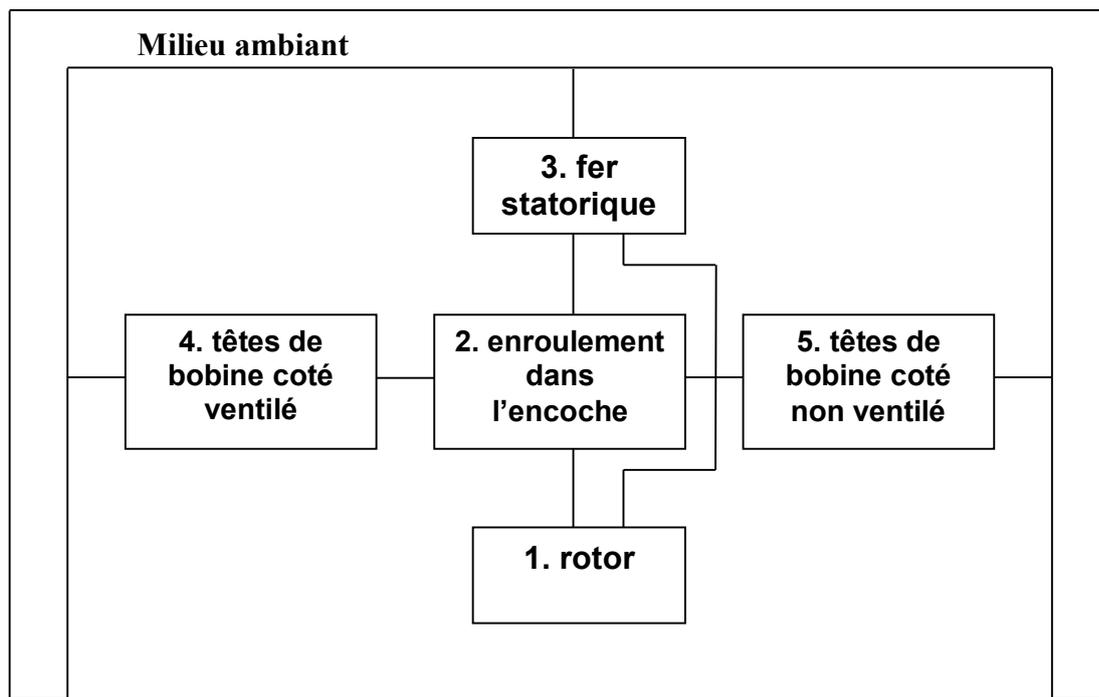


Fig-II-6 : découpage en 5 corps du moteur à induction.

En régime permanent, on détermine la température aux nœuds en résolvant le système suivant :

$$[G]\{\theta\} = \{P\} \quad (\text{II-13})$$

Où :

G : la matrice des conductances thermique.

Θ : le vecteur de températures inconnues.

P : le vecteur des sources de chaleur (pertes).

Après avoir discrétisé l'ensemble du domaine, on écrit pour chaque nœud les équations de transfert associées. Ces équations s'écrivent :

$$C_i \cdot \frac{d\theta_i}{dt} = \sum_{j=1}^n G_{ji} (\theta_j - \theta_i) + P_i \quad (\text{II-14})$$

Avec :

C_i : capacité thermique de bloc i [j/°C].

θ_i et θ_j : température des blocs i et j [°C].

G_{ji} : conductances thermiques de connexion entre les blocs j et i [W/°C].

P_i : chaleur générée dans le bloc i [w].

$$C_i = \rho_i \cdot v_i \cdot c_i$$

ρ_i : La masse volumique (kg/m³).

V_i : volume élémentaire de nœud i (m³)

C_i : la capacité massique (j/kg.°c) :

Les difficultés liées à cette méthode sont de trois ordres :

- La détermination des coefficients conductibilité et des capacités thermique dans les matériaux non homogènes ;
- La localisation de source de chaleur nécessairement discrètes alors que les pertes sont distribuées ;
- La prise en compte de la ventilation ;

II-6-2-2 Méthodes numériques :

Les principales méthodes numériques étant les différences finies et les éléments finis. Ces méthodes sont très utilisées dans le domaine de la thermique. Elles présentent de plus en plus de grands avantages, elles sont basées sur un découpage plus ou moins fin du système modélisé et permettent de tenir compte de plusieurs paramètres (non linéarité, géométrie complexe...), généralement non considérées avec les méthodes analytiques.

II-6-2-2-1 Méthode des différences finies :

La méthode des différences finies a trouvé diverses applications dans les domaines traditionnels de la thermique. Cette méthode permet la résolution numérique des équations dérivées de la forme

différentielle de l'équation de transfert. A chaque élément est associé un nœud relié aux nœuds voisins par un nombre fini de connexion. La température de chaque nœud est exprimée en fonction de celle des nœuds adjacents.

II-6-2-2-2 Méthode des éléments finis : [4]

La méthode des éléments finis permet de résoudre des problèmes d'équation aux dérivées partielles. Le principe fondamental de cette méthode réside dans le passage du milieu continu à sa représentation discrétisée. Cela revient à découper la représentation du domaine en ensemble de sous-domaines élémentaires appelées éléments finis.

II-7 Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre les différents modes de transfert de chaleur dans une machine asynchrone à cage. Comme les sources de la chaleur se situent dans les corps solides de la machine, l'évolution vers l'équilibre thermique avec le milieu extérieure ce fait essentiellement par conduction et convection thermique.

CHAPITRE III
MOYENS DE MESURE DE TEMPERATURE
DANS UNE MACHINE ELECTRIQUE

III-1 Introduction

La température d'un objet est déterminée par la sensation de chaud ou de froid ressentie en le touchant. Techniquement, la température est une mesure de l'énergie cinétique moyenne des particules dans un échantillon de matière, exprimée en degrés sur une échelle standard. Il est possible de mesurer la température de plusieurs façons différentes qui se distinguent par le coût des équipements et la précision [6].

La mesure de cette énergie n'est pas accessible directement, on utilise l'effet de la chaleur sur certaines propriétés physiques, comme la dilatation des métaux ou des liquides, la résistance électrique, la tension thermoélectrique, la fréquence des oscillations d'un quartz, etc.

Pour mesurer la température dans des endroits différents d'une machine électrique en plein fonctionnement, on fait appel à trois méthodes différentes :

- ✓ Méthode de mesure par contact directe.
- ✓ Méthode de mesure sans contact.
- ✓ Méthode de mesure mixte.

III-2 Méthode de mesure par contact directe.

Cette méthode est utilisée beaucoup plus dans les parties fixes des machines électriques pour relever la température avec des capteurs qui transmettent l'information de la température par un contact directe, entre la partie de la machine et le capteur [4].

Les capteurs les plus utilisés sont les thermocouples et les thermistances.

III-2-1 Les thermocouples [6].

Un thermocouple est un montage constitué de deux fils de métaux différents, soudés à l'une de leurs extrémités. Cette jonction porte le nom usuel de « soudure chaude » et sera installée dans le milieu dont la température est à mesurer. Les deux autres extrémités sont à relier aux bornes d'un voltmètre. Les deux jonctions formées aux bornes du voltmètre portent le nom usuel de « soudures de référence » ou « soudures froides ».

Afin que la conversion de la tension mesurée en température soit facilitée, il est nécessaire de s'assurer que les deux « soudures de référence » se trouvent à la même température.

La tension mesurée par le voltmètre est fonction de la température de la « soudure chaude » et de la température des « soudures froides »

❖ Effet Seebeck.

L'effet Seebeck décrit la force électromotrice (FEM) ou la tension induite par le gradient de température le long du fil. La variation de la force électromotrice du matériau par rapport à une variation de température est appelée coefficient de Seebeck ou sensibilité thermoélectrique. Ce coefficient est généralement une fonction non linéaire de la température [6].

Cependant, pour de petites variations de température sur la longueur d'un conducteur, la tension est à peu près linéaire, ce qui peut être représenté par l'équation suivante où ΔV est la variation de tension, S le coefficient de Seebeck, et ΔT la variation de température :

$$\Delta T = S \cdot \Delta V \quad \text{(III-1)}$$

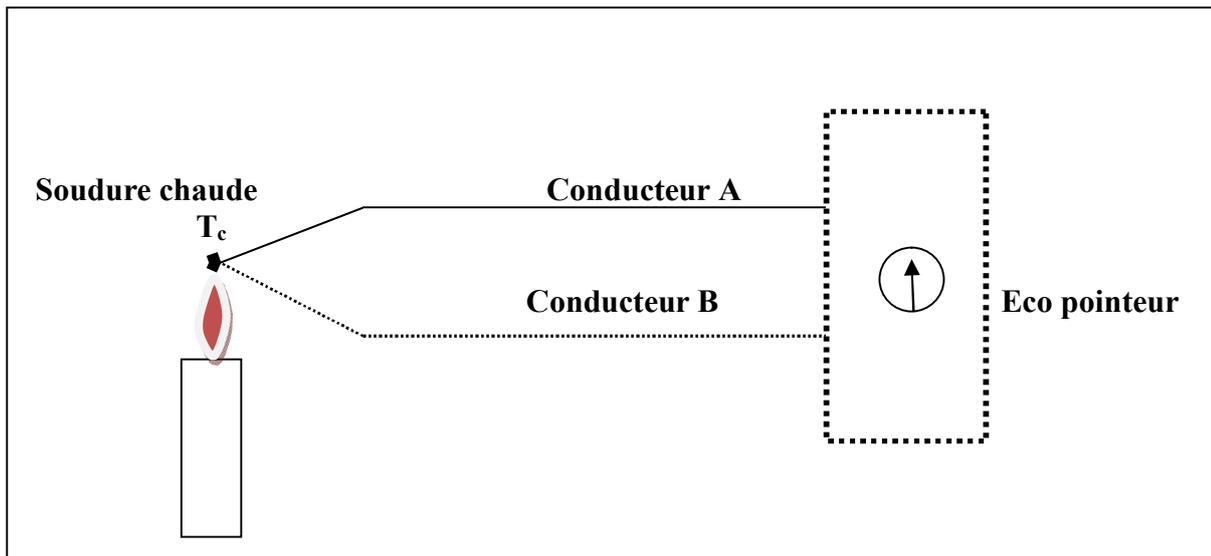


Fig. III-1 Schéma d'une réalisation d'un thermocouple

III-2-2-1 Température de référence d'un thermocouple [11].

Afin de déterminer la température de la soudure chaude, il est nécessaire de connaître la température des soudures froides, (température de référence)

La FEM des thermocouples dépend à la fois de la température T_c de la jonction placée au point de mesure et la température, $T_{\text{réf}}$ aux jonctions formées aux bornes de voltmètre. (soudures froides).

Pour ce qui est de cette dernière, on peut distinguer trois cas :

- La température de référence nulle. $T_{réf}=0$
- La température de référence constante. $T_{réf} \neq 0$
- La température de référence variable, généralement $T_{réf} = T_{amb}$

a. **Température de référence est nulle.** Si la température de référence est maintenue à 0 °C (glace fondante), la FEM des thermocouples les plus couramment employés a été tabulé lors de la construction de la norme ISO. Dans ce cas on peut connaître immédiatement la température T_c à l'aide de table du thermocouple utilisé.

a. La température de référence est constante, $T_{réf} \neq 0$

Lorsque la température ambiante risque de dépasser les limites de la plage de fonctionnement. La température de référence peut alors être obtenue à l'intérieur d'une enceinte chauffée dont la température interne qui sert de référence, est maintenue constante par régulation, à une valeur supérieure à l'ambiant. La connaissance de $T_{réf}$ permet, à l'aide de la table du thermocouple de calculer :

$E_{a/b}^{T_{réf} 0^\circ}$, la mesure de la f.é.m. du thermocouple fournit une valeur correspondante à :

$E_{a/b}^{T_c T_{réf}}$; Et on déduit la f.é.m. dont le thermocouple serait le siège si la température de référence était de 0°C :

$$E_{a/b}^{T_c 0^\circ} = E_{a/b}^{T_c T_{réf}} + E_{a/b}^{T_{réf} 0^\circ} \quad \text{(III-2)}$$

c. La température de référence égale à l'ambiante.

Connaissant la valeur de la température ambiante T_a à l'instant de mesure on procède comme dans le cas précédent :

$$E_{a/b}^{T_c 0^\circ} = E_{a/b}^{T_c T_a} + E_{a/b}^{T_a 0^\circ} \quad \text{(III-3)}$$

Cependant, il existe des circuits dits de correction de soudure froide, qui délivrent automatiquement

une tension $V(T_a)$ égale à $E_{a/b}^{T_a 0^\circ}$; celle-ci ajoutée à la f.é.m. du thermocouple $E_{a/b}^{T_c T_a}$, permet

d'avoir aux bornes du circuit de mesure la f.é.m. $E_{a/b}^{T_c 0^\circ}$

III-2-2-2 Différents types de thermocouples.

Un thermocouple est créé lorsque deux métaux de natures différentes entrent en contact au niveau de l'une de leurs extrémités et que l'on effectue une mesure au niveau de leur autre extrémité, créant ainsi une faible tension en circuit ouvert qui correspond à la différence de température entre le point de contact et le point de mesure. La tension mesurée depuis le thermocouple est équivalente à la différence entre la tension de Seebeck aux bornes de chaque conducteur,

Il existe plusieurs types de thermocouples, désignés par des lettres capitales indiquant leur composition conformément aux conventions ANSI (American National Standards Institute). Un thermocouple de type J, par exemple, est constitué d'un conducteur en fer et d'un autre en constantan (alliage de cuivre et de nickel). Vous trouverez une liste exhaustive des thermocouples dans le Tableau suivant.

Type de thermocouple	Conducteur-positif	Conducteur-négatif
B	Platine rhodié à 30%	Platine rhodié à 6%
E	Alliage nickel/chrome	Alliage cuivre/nickel
J	Fer	Alliage cuivre/nickel
K	Alliage nickel/chrome	Alliage nickel/aluminium
N	Alliage nickel/chrome/silicone	Alliage nickel/silicone/magnésium
R	Platine rhodié à 13%	Platine
S	Platine rhodié à 10%	Platine
T	Cuivre	Alliage cuivre/nickel

Tableau III-1. Compositions et lettres désignant les thermocouples normalisés

III-2-1-3 Avantages et inconvénients des thermocouples.

a. Avantage.

- une vitesse de réponse élevée.
- Gamme de température très large.
- Une grande souplesse d'utilisation et non encombrant.
- Faible coût d'achat.

- Robustesse.
- Ne nécessite pas une alimentation.

b. Inconvénients.

- Température de référence doit être connue :
- La non-linéarité.
- Faible amplitude de signal.
- La nécessité d'une correction due à la température de la soudure froide.

La figure suivante présente deux exemples de thermocouples :



Fig : III-2 : exemples des thermocouples.

III-2-2- Les thermistances.

III-2-2-1 Constitution et principe.

Une thermistance est un élément de détection de température, composé d'un matériau semi-conducteur fritté qui présente une variation importante de la résistance, proportionnelle à un petit changement de température. Une thermistance a généralement des coefficients de température négatif (NTC) ce qui signifie que la résistance de la thermistance diminue lorsque la température augmente [6].

• **Caractéristiques de résistance en fonction de la température.**

L'équation de Steinhart-Hart est devenue la méthode généralement acceptée pour définir la courbe de température en fonction de la Résistance pour une thermistance.

$$\frac{1}{T} = a + b \ln(R) + c \ln(R)^3 \quad \text{(III-4)}$$

Où: a, b et c sont des constantes fournies par le fabricant de thermistance, ou dérivées de 3 points d'essai de température.

T : est la température en degrés kelvin.

R : est la résistance de thermistance en ohms.

Selon le coefficient de température des thermistances, positif ou négatif, la courbe de la résistance en fonction de la température est montante ou descendante, d'où on distingue deux types de thermistances :

- ✓ CTP (coefficient de température positif) ; courbe a
- ✓ CTN (coefficient de température négatif) ; courbe b

Les courbes suivantes représentent les caractéristiques des deux types de thermistances :

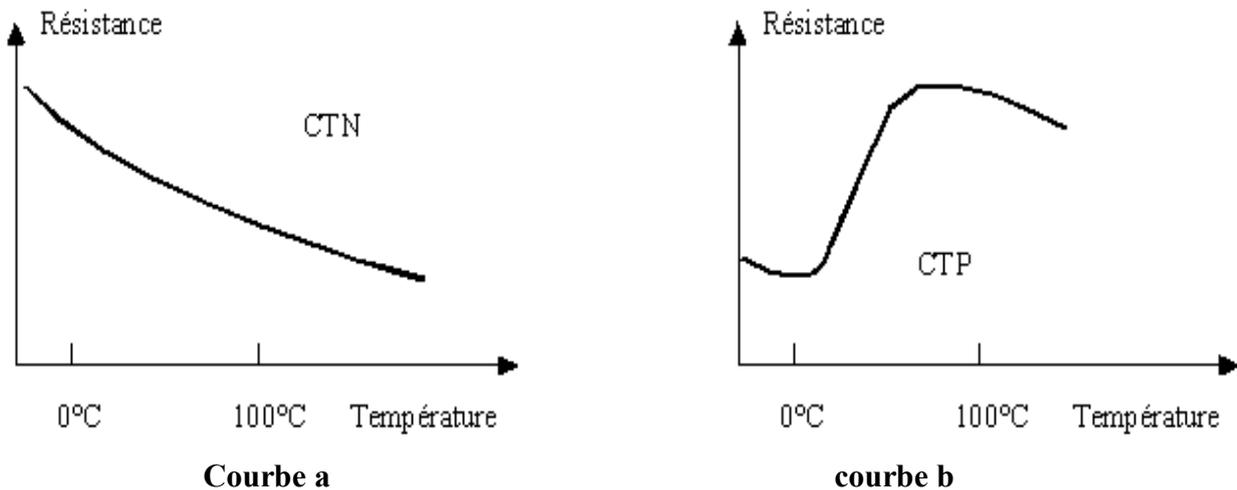


Fig III-3 : Caractéristiques typiques d'une thermistance CTN et d'une CTP.

- Les thermistances CTN ont comme composants principaux le **NiO**, **MnO**, **Fe₂O₃**, et ont une constitution cristalline proche de la constitution spinale.

- Les thermistances CTP sont basées autour du groupe cristallin BaTiO_3 , dont on contrôle la valeur atomique en ajoutant des éléments de terre rares comme Y_2O_3 , et qui devient ainsi un semi-conducteur [4].

III-2-2-2 Avantages et inconvénients des thermistances.

a. Les avantages de l'utilisation d'une thermistance.

- **Précision** : La thermistance est l'un des types les plus précis des capteurs de température. Les thermistances OMEGA ont une précision de $\pm 0,1^\circ$.
- **Stabilité** : Les thermistances terminées sont chimiquement stables et ne sont pas significativement affectées par le vieillissement.
- **Dimension** réduite permettant des mesures ponctuelles de la température.

b. Les inconvénients.

- La thermistance est assez limitée dans sa plage de température, et ne fonctionne que sur une plage nominale de -80°C à $+120^\circ\text{C}$.
- Non linéarité imposant un étalonnage en plusieurs points.
- Nécessité d'une alimentation et le passage de courant risque de provoquer un échauffement du capteur.

La figure suivante représente quelques exemples de thermistances.

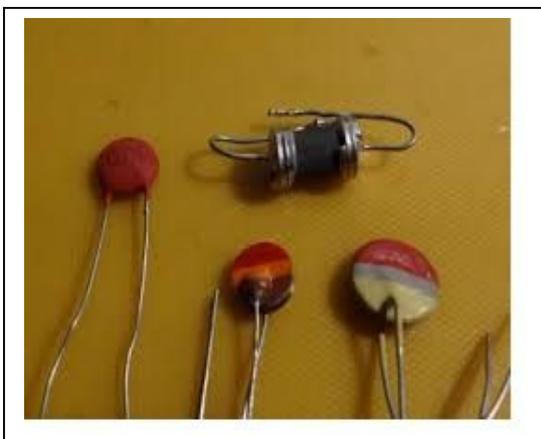


Fig : III-4 : photos des thermistances.

II-3 Comparaison entre les thermocouples et les thermistances.

Des études comparant les avantages et les inconvénients des thermocouples et les thermistances, guident le choix de l'utilisation de ces capteurs.

On donne sur le tableau (III-2), une comparaison des principales caractéristiques de ces capteurs :

Caractéristiques	Thermistances	Thermocouples
Précision	Plus précis	Moins précis
Encombrement	Important	Réduit
Coût	Plus cher	Moins cher
Temps de réponse	Lent	Rapide
Alimentation	Nécessaire	Pas nécessaire
Auto échauffement	Existant	Non existant
Reproductibilité des résultats	Bonne	Moyenne
Stabilité dans le temps	Bonne	Moins bonne
Gamme de température	Réduite	Large
Sensibilité	Peu sensible aux bruits extérieurs	Assez sensible aux parasites

Tableau III-2 : comparaison des caractéristiques principales des thermistances et des thermocouples

III-3 méthode de mesure de température sans contact.

La méthode de mesure sans contact consiste à transmettre l'information de la température et de ses variations sans aucun contact matériel entre l'élément sensible et le point de mesure.

III-3-1 Pyrométrie optique.

La pyrométrie optique est un instrument de mesure de la température de surface d'un objet à partir de l'émission de lumière de type corps noir qu'il produit. Le principe de fonctionnement est basé sur la mesure du rayonnement de l'objet dans le domaine de l'infrarouge d'où le nom de thermomètre infrarouge. On utilise également le terme de **pyromètre infrarouge** lorsqu'il s'agit de mesurer des températures élevées d'un objet ou d'un environnement (incendie, four, etc.). Les deux termes expriment la différence avec un thermomètre à contact classique puisqu'ils mesurent le rayonnement thermique émis et non la température elle-même [6].

III-3-2 Principe physique.

Le pyromètre infrarouge mesure la température par quantification de l'énergie radiative émise dans l'infrarouge. Tout objet au-dessus du zéro absolu (0 K) émet ces radiations, en connaissant la quantité d'énergie émise par un objet, et son émissivité, sa température peut donc être déterminée. Schématiquement, le procédé consiste à mesurer l'énergie lumineuse (située dans l'infrarouge) sur un détecteur permettant de la convertir en un signal électrique. Cette méthode permet de mesurer la température à distance, contrairement aux autres types de thermomètres comme les thermocouples. Ainsi il est possible de mesurer la température si l'objet est en mouvement, s'il est entouré d'un champ électromagnétique, s'il est placé dans le vide, etc. [11].

Les images suivantes montrent quelques types de pyromètre infrarouge.



Fig : III-5 pyromètre infrarouge.

III-3-3 Applications du pyromètre infrarouge.

Ce dispositif permet ainsi de mesurer à distance la température d'un objet avec une grande précision. Parmi les applications courantes, on trouve les mesures sur les objets en mouvement, corrosifs, en réacteur sous vide ou soumis à des champs électromagnétiques intenses ainsi que toutes les applications exigeant des temps de réponses très courts.

- le contrôle de produits alimentaires sous emballage, à condition de ne pas réaliser de mesures dans les poches d'air.
- le contrôle de la température d'un four ou d'autres équipements.
- la vérification d'équipements mécaniques ou de circuits électriques (exemple : armoires électriques).

- la détection de zones chaudes lors d'un incendie.
- le contrôle du réchauffement ou du refroidissement de matériaux avec précision ;
- la détection de nuages pour les télescopes.

III-3-4 Caméra thermique [10].

Une caméra thermique fig.III-6, enregistre différents rayonnements infrarouge (ondes de chaleur) émis par les corps et qui varient en fonction de leur température. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, une caméra thermique ne permet pas de voir derrière une paroi ou un obstacle. Elle reproduit la chaleur emmagasinée par un corps, ou montre le flux thermique d'une paroi en raison d'un foyer se trouvant à l'arrière.

Bien que la longueur d'onde du rayonnement infrarouge dépende de la température, les caméras thermiques ont en général un seul canal (comme une caméra qui filme en "noir et blanc"), et les caméras se contentent de produire une image de l'intensité du rayonnement, qui permet également d'apprécier la température de la source. La couleur produite par la caméra est une fausse couleur, obtenue en associant une couleur à l'intensité reçue, afin de faciliter la lecture directe de la température : à chaque couleur de l'image correspond une température.

III-3-5 Avantages et inconvénients de la caméra thermique.

a- Avantage.

- Possibilité d'effectuer des mesures de pièces sous tension (composantes électrique ; électronique)
- Distance de mesure importante.
- Possibilité d'effectuer des mesures sur des pièces en mouvement (la partie tournante de la machine électrique).

b- Inconvénients.

- La caméra thermique donne une carte de température surfacique. Elle ne permet pas de voir les informations en profondeur.
- La camera n'indique pas la température thermodynamique de milieu, elle est préalablement étalonnée par le fabricant et une liste des émissivités des différentes matières est fournie.

Les images suivantes montrent une caméra thermique.



Fig: III-6 camera thermique.

III-4 Conclusion.

Nous avons présentés dans ce chapitre les différents moyens utilisés pour l'étude thermique expérimentale des machines électriques. A savoir, selon les propriétés de la matière des machines et le phénomène physique sensible à la température.

Nous disposons deux méthodes de mesure :

La méthode dite par contact directe, dont on utilise des thermocouples qui se basent sur la variation thermique sous l'effet thermoélectrique, et des thermistances qui traduisent la variation thermique à une valeur d'une résistance.

Et la méthode sans contact avec des pyromètres optiques et caméra thermique qui offrent la possibilité de mesure de la température dans quelques endroits de la machine plus facilement que les capteurs par contact, la partie tournante de la machine par exemple.

Le chapitre suivant sert à exploiter ces différents moyens de mesure pour l'étude de la machine.

CHAPITRE IV
MESURES EXPERIMENTALES DE LA
TEMPERATURE EN DIFFERENTS POINTS
D'UNE ENCOCHE STATORIQUE

IV-1 Introduction.

Pour mesurer la température dans une encoche statorique, on utilise un stator creu (juste le circuit magnétique statorique), cela à cause de l'impossibilité de placer des capteurs dans l'encoche de la machine d'étude déjà construite. Pour ce faire, nous commençons par présenter la machine d'étude, puis le stator cru d'essai, et enfin le banc d'essai.

Avant de réaliser les mesures de température, des tests préliminaires sont nécessaire, notamment l'étalonnage des thermocouples, des essais sur la machine d'étude.

Par la suite des essais de mesure de température dans une encoche de stator creu sont effectués. En fin les résultats obtenus sont présentés, comparés et interprétés.

IV-2 Présentation de la machine à étudier.

La machine qui fait l'objet d'études est un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil portant les caractéristiques suivantes :

- Type 890-1064-0041.
- Marque ENEL (électro-industrie) N°22-128-02.
- Puissance 2.2 kw.
- Tension nominale 380 V
- Courant nominal 5.2 A en triangle.
- Vitesse de rotation 1410 trs/min.
- Facteur de puissance $\cos\theta=0.83$.
- Classe d'isolation F (155°)

IV-3 Présentation de stator cru.

A cause de l'impossibilité d'emplacement des capteurs dans le fond de l'encoche du stator d'une machine déjà construite on a choisis de faire nos essais sur un stator cru, représenté sur la figure (Image IV-1).

- Le stator a les caractéristiques suivantes :
 - Tôles : type ; 106/4 nombre ; 870-400-0010.
 - Diamètre extérieur : 170 mm
 - Diamètre intérieur : 115 mm
 - Longueur de paquet de tôles : 90 mm
 - Nombre d'encoches : 36

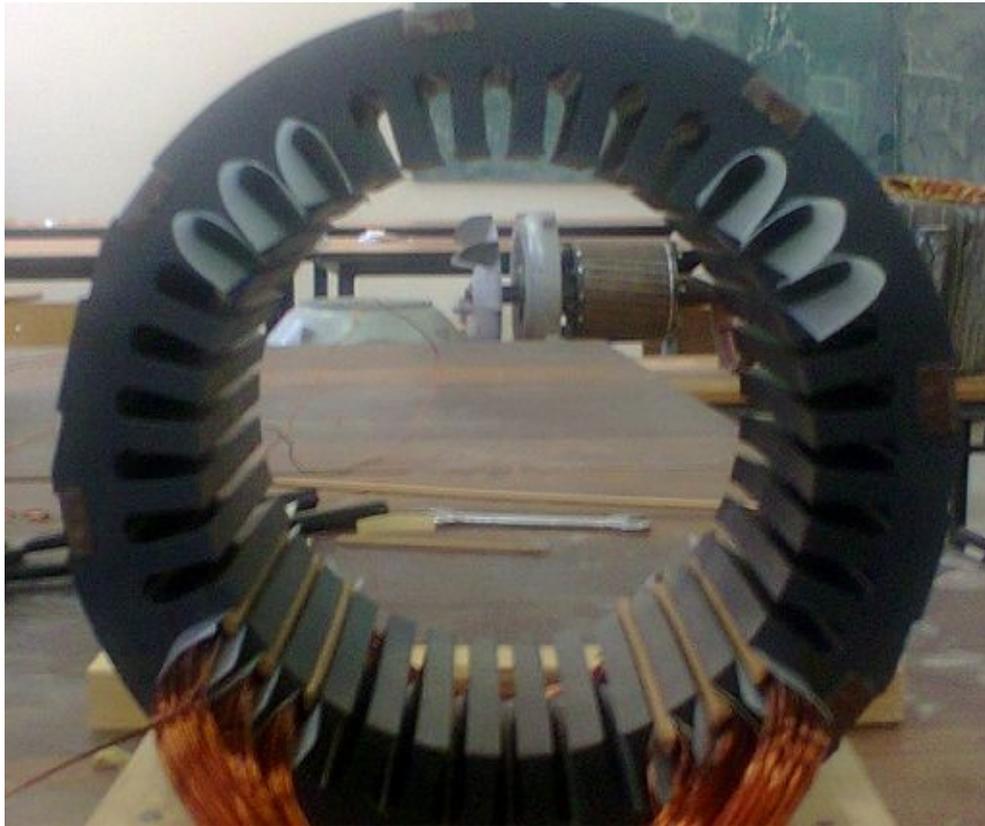


Image IV-1 : photo du stator d'essai

- Les dimensions de l'encoche sont représentées sur la figure suivante :

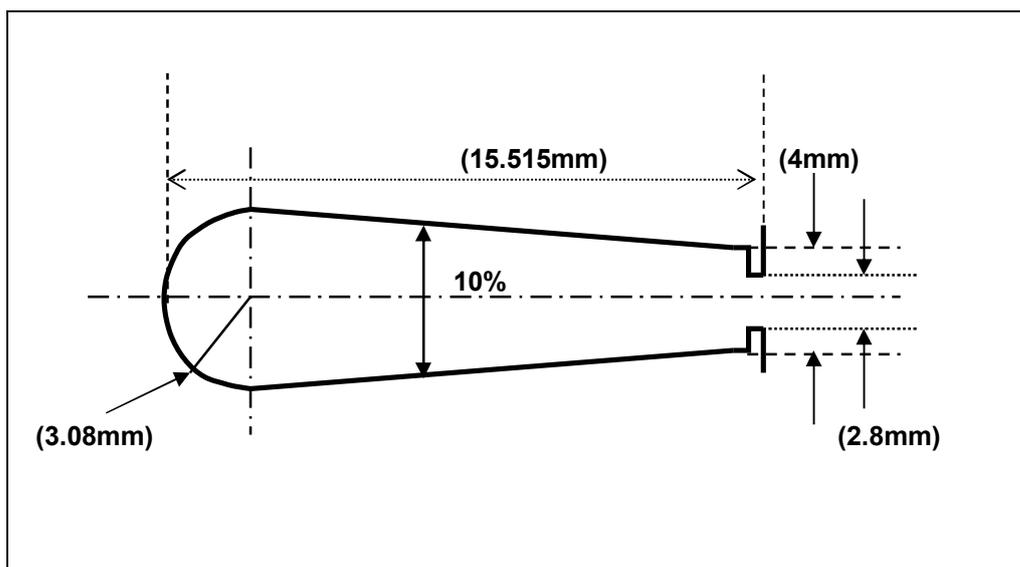


Fig : IV-1 : schéma d'une encoche statorique.

V-4 Description du banc d'essai.

Le matériel utilisé pour effectuer les mesures de la température sur le moteur asynchrone et le stator est le suivant :

- Source de tension de 380V
- Source de tension de 220V
- Un autotransformateur utilisé comme source de tension alternative variable (0-250V) et de courant variable (0- 20A)
- Différents appareils de mesure (ampèremètre, voltmètre, wattmètre, chronomètre, thermomètre à mercure).
- Capteurs de température (thermocouples de type K, camera infra rouge).
- Eco pointeur, (appareil de mesure digitale de la température)
- Des fils électriques (conducteurs).
- Fil de cuivre pour le bobinage, diamètre $\phi = 0,71\text{mm}$.
- Papier isolant.
- Un rotor à cage.

IV-5 Emplacements des thermocouples dans la machine asynchrone.

Le moteur qui est l'objet d'étude est équipé de sept (7) thermocouples de type K, permettant de mesurer la température. Cinq sont placés sur la partie statorique, (fig IV-3).

Dans notre étude on s'intéresse à trois thermocouples ceux qui sont placés comme suit :

- **TH5** : tête de bobine cotée ventilé.
- **TH7** : tête de bobine cotée non ventilé.
- **TH8** : carcasse.

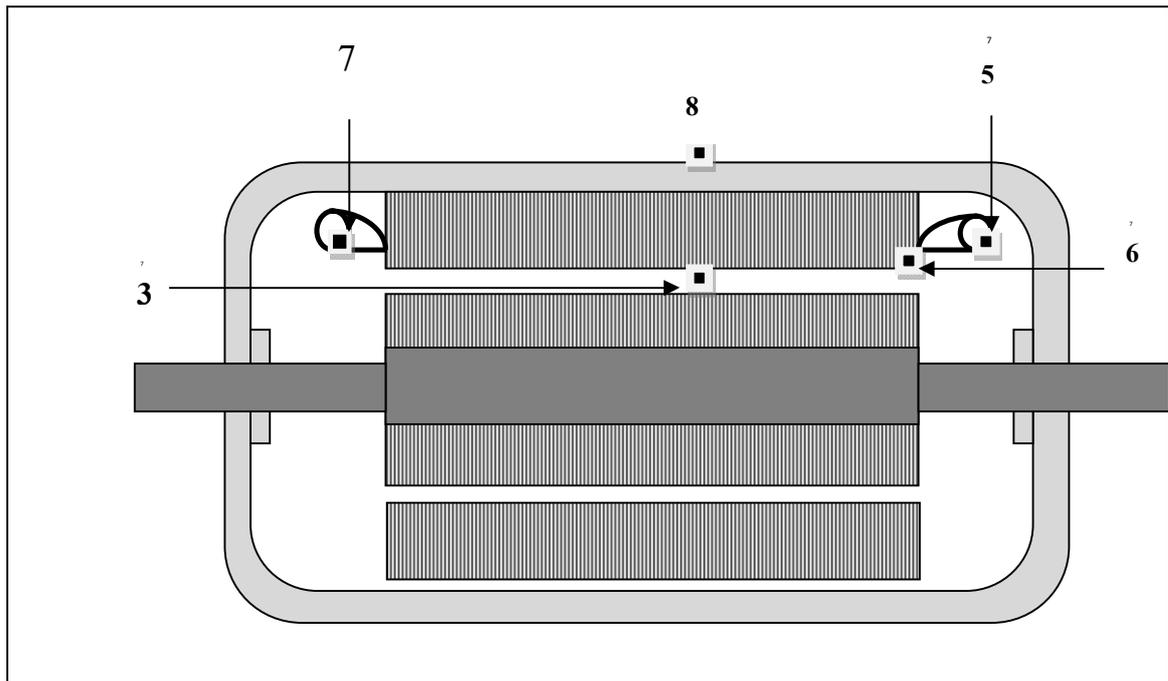


Fig : IV. 2 : Emplacement des thermocouples dans la machine.

V-6 Mesures préliminaires :

Les mesures préliminaires permettent de s'assurer du bon fonctionnement des appareils et les indications des capteurs. Pour cela on commence par l'étalonnage des thermocouples.

V-6-1 Etalonnage des thermocouples.

Dans cet essai on utilise un four dont la température est connue, cette température nous sert comme température de référence pour étalonner les capteurs, et dont le schéma et représenter sur la fig. IV-3.

V-6-1-1 Présentation et principe de l'essai.

Le four utilisé pour l'étalonnage des thermocouples est une enceinte isotherme, sa température est connue et réglable, à partir de l'ambiante jusqu'à 250°C. Ce four est alimenté par une source de tension de 380V, et doté d'un thermomètre numérique indiquant la température qui règne à l'intérieur du four.

On place les trois thermocouples de type K à l'intérieur du four sur trois points différents mais chacun est proche de l'autre, et un thermomètre à mercure gradué jusqu'à 50°C qui sert à mesurer la température ambiante pour les essais prochains.

Au début de l'essai la température de four est réglée à la température ambiante, soit de 27°C.

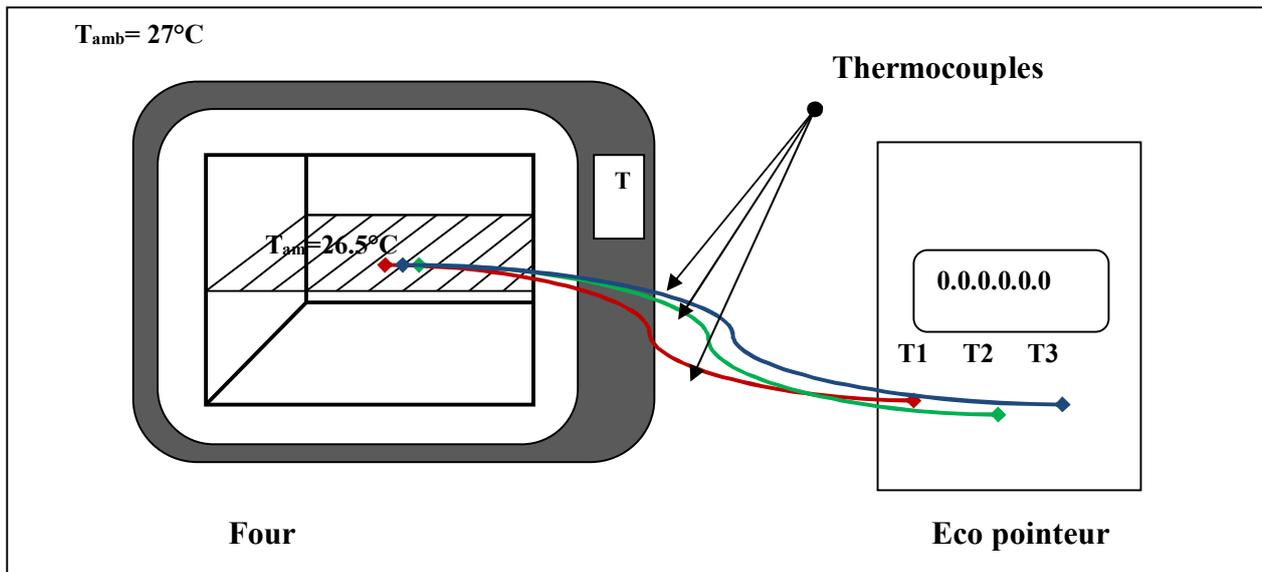
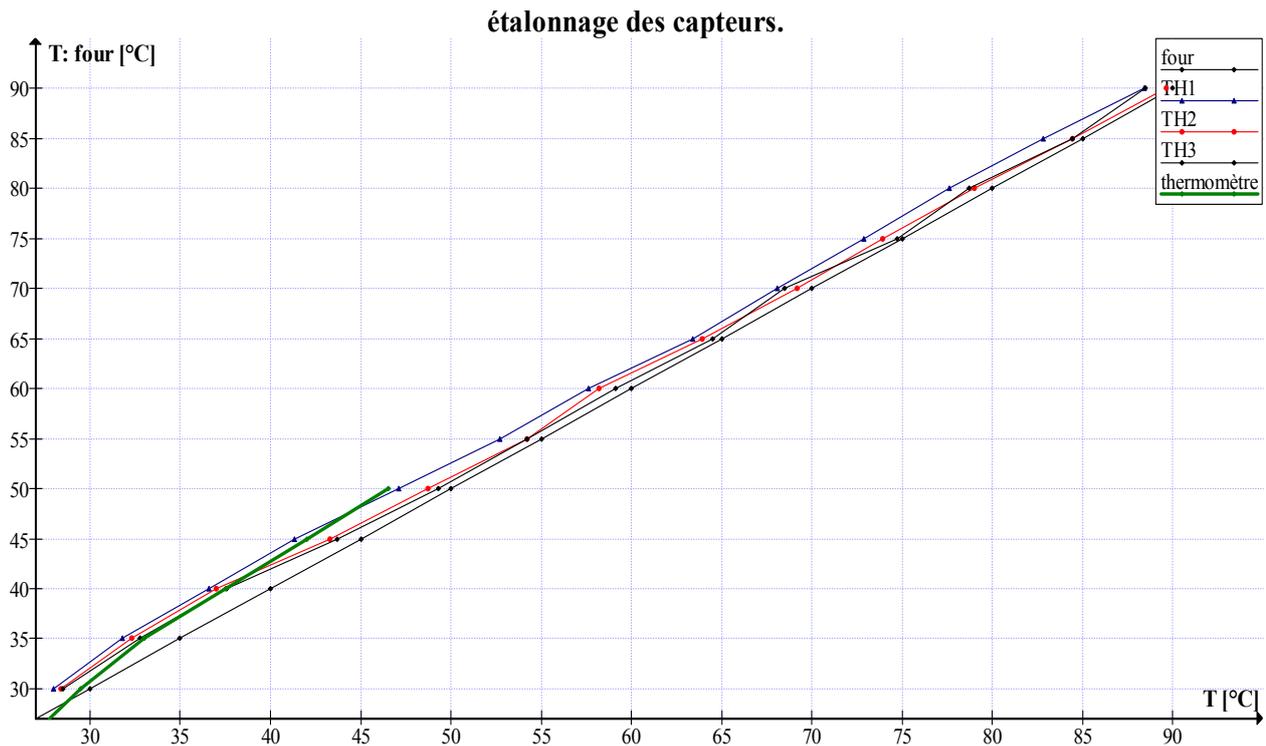


Fig. VI-3 : schéma descriptif de l'essai d'étalonnage.

- On prend les valeurs des trois thermocouples et celle de thermomètre à l'instant où le four est éteint. ($T_{th1} = 24.5^{\circ}\text{C}$; $T_{th2} = 24.2^{\circ}\text{C}$; $T_{th3} = 25^{\circ}\text{C}$; $T_{ter} = 26.5^{\circ}\text{C}$)
- On met le four en marche et on fait varier sa température, à partir de l'ambient jusqu'à 90°C , par pas de 5°C et on relève les valeurs des trois thermocouples et celle du thermomètre.
- À partir de ces valeurs on obtient le tracé des courbes suivantes :



Courbe IV-1 : Etalonnage des thermocouples.

V-6-1-2 : observations :

- On constate qu'au début des mesures les thermocouples présentent un retard de réponse par rapport à la référence, soit environs 2°C. Cette erreur existe lorsque la différence de potentiel entre la soudure de mesure et la soudure de référence est nulle, mais avec l'échauffement des capteurs la différence de potentiel augmentent et l'erreur diminue, et la température mesurée par les thermocouples se rapproche de la température de référence du four.
- Le thermomètre à mercure affiche une valeur proche de la température ambiante dans le four (27.5°C), puis avec l'échauffement du four il devient en retard de 2 degrés. Comme le thermomètre à mercure est un appareil destiné à mesuré la température ambiante il n'est pas conçu pour répondre au changement rapides de température.

V-6-2 Mesure de la température des têtes d'une bobine de la machine à l'arrêt.

Pour prendre des mesures de la température des têtes d'une bobine de la machine à l'arrêt, on alimente une phase qui contient la bobine contenant les capteurs, et au fur et à mesure on prend les valeurs de la température.

V-6-2-1 : Le choix de la bobine :

Pour notre essai il faut alimenter la bobine qui contient les capteurs. Pour cela on alimente une phase, et on observe l'échauffement de la bobine, et le temps écoulé.

En premier lieu on a alimenté la phase U_1U_2 pendant 20 minutes et on a atteint une température de 39°C pour le capteur TH7 et 38°C pour TH5.

Quand on a alimenté la phase V_1V_2 les thermocouples affichent la valeur de 40°C pour 2 minutes seulement. Donc les capteurs sont placés sur la bobine de la phase V_1V_2 .

V-6-2-2 : Présentation du montage et principe de l'essai.

- On alimente la phase V_1V_2 par l'autotransformateur avec une tension variable et on branche un ampèremètre pour régler la valeur de l'intensité de courant à 3A. Pour cette valeur de courant le voltmètre affiche une valeur de tension de 77V et le wattmètre affiche une valeur de 140W.

La résistance de la phase est $R = 8.2\Omega$, mesurée par un ohmmètre.

Le schéma de montage est sur la figure IV-5.

Au début de l'essai avant l'alimentation de la machine la température ambiante, $T_a = 26^\circ\text{C}$. Les deux thermocouples TH5 et TH7 affichent une valeur de la température $T_{th} = 29^\circ\text{C}$.

On alimente la machine avec une tension de 77 Volts, pour un temps de 90 minutes et on relève les valeurs des températures des thermocouples TH5 et TH7.

Le tracé des courbes est sur la figure (courbe IV-2).

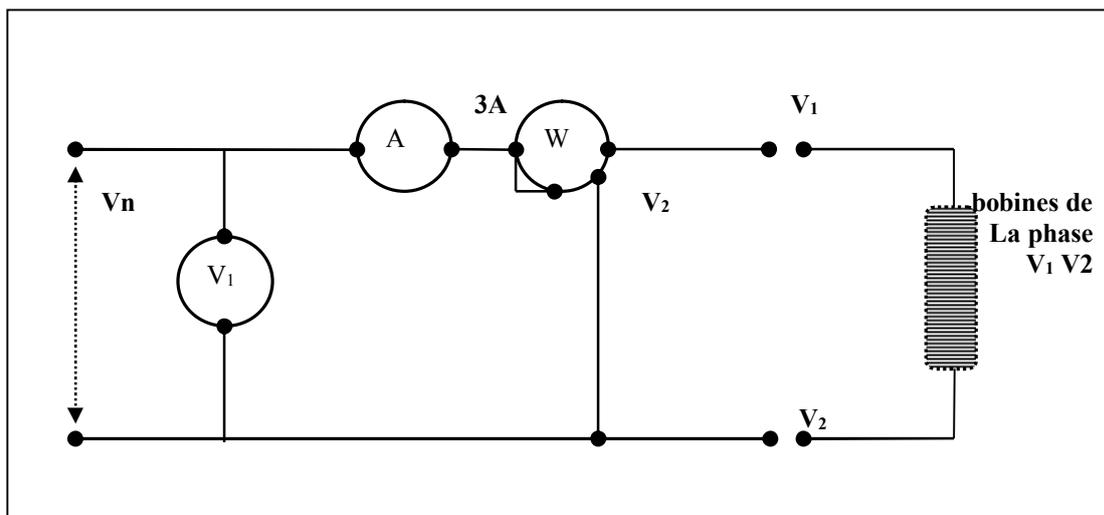
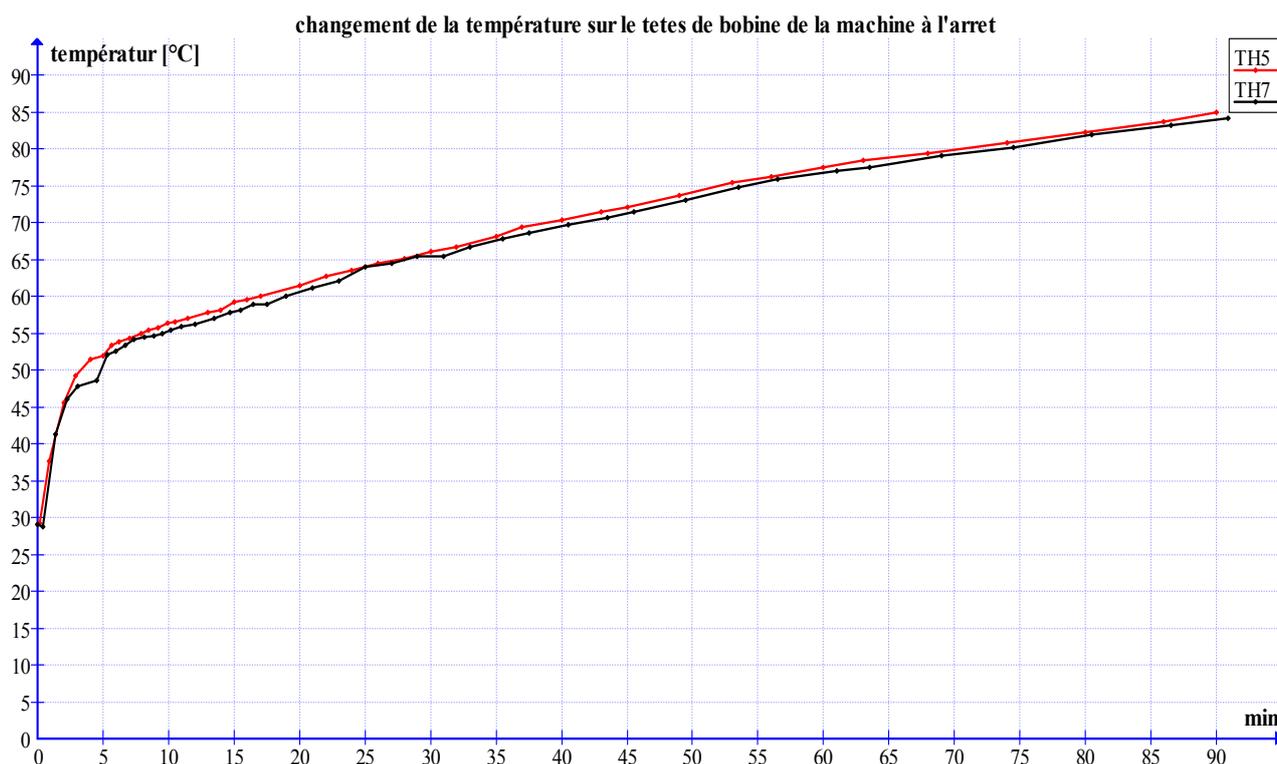


Fig IV -4 : schéma de montage de l'essai de la machine à l'arrêt.



Courbe IV-2 : essai sur la machine à l'arrêt.

V-6-2-3 : observations et interprétations.

- La température ambiante dans la machine est 29°C soit 3°C de plus par rapport à la température ambiante du labo, et cela due au fait que la bobine n'est pas totalement refroidie après l'essai du choix de la bobine.
- La température passe de 29°C à 50° en moins de cinq minutes, et après la variation de la température devient très lente, soit de 50° à 80° pendant 85 minutes.
- Après le régime transitoire, la température tend à se stabilisée.
- La température des bobines n'est en aucun cas constante mais croit très lentement, car la machine est en arrêt et sans ventilation ce qui ralentir le transfert de chaleur.
- A la fin de l'essai la température de la carcasse de la machine est $T_c = 61.2^\circ\text{C}$.

V-7 Etude expérimentale de la température dans une encoche statorique.

Dans cet essai on mesure la température sur deux points d'une encoche statorique, et une tête de bobine montée sur le stator creu.

V-7-1 Présentation du montage.

Dans ce montage on utilise un stator creu sur lequel est monté deux bobines d'une phase, trois capteurs, et un rotor à cage introduit dans le stator,

A. Le stator : on utilise un stator de 36 encoches et de longueur de 90 millimètres, les diamètres intérieur, et extérieur sont respectivement ; $D_1= 115\text{mm}$, $D_2= 170\text{mm}$.

B. Le bobinage : est réalisé avec un fil de cuivre de diamètre nu $D_e= 0.71\text{mm}$. nous avons préparé au labo deux bobines de trois sections concentriques pour chaque bobine, chaque section contient 64 spires.

La longueur de la bobine, $L = 130 \text{ mm}$ et la largeur $Y = 110 \text{ mm}$

Les résistances des deux bobines sont : $R_1= 5\Omega$ et $R_2= 5.2\Omega$ soit 10.2Ω pour la résistance équivalente.

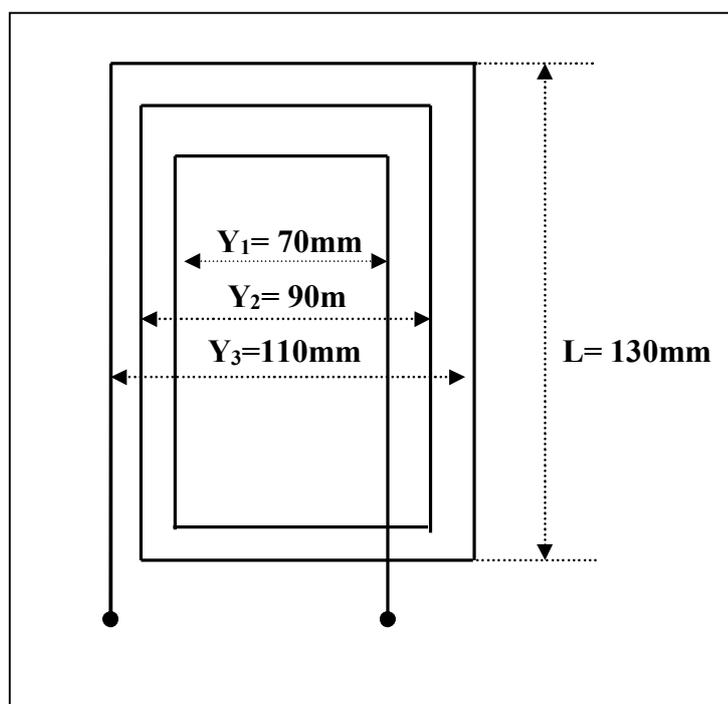


Fig IV-5 : bobinage concentrique.

Remarque : pour compenser la différence de la longueur qui existe entre le stator d'essai ($L_{es}=90\text{mm}$) et le stator de la machine ($L_m=110\text{mm}$) on a augmenté la longueur de la bobine.

C. Emplacement des capteurs dans l'encoche.

Avant le montage de la bobine dans le stator on met du papier isolant dans l'encoche et le capteur TH1 au fond, et ensuite on place le capteur TH2 au milieu de l'encoche entre les fils d'une section et on fixe la bobine par des cales en bois, et le troisième capteur TH3 est placé sur la tête de la bobine. La figure IV-7 montre l'emplacement des capteurs dans l'encoche du stator cru.

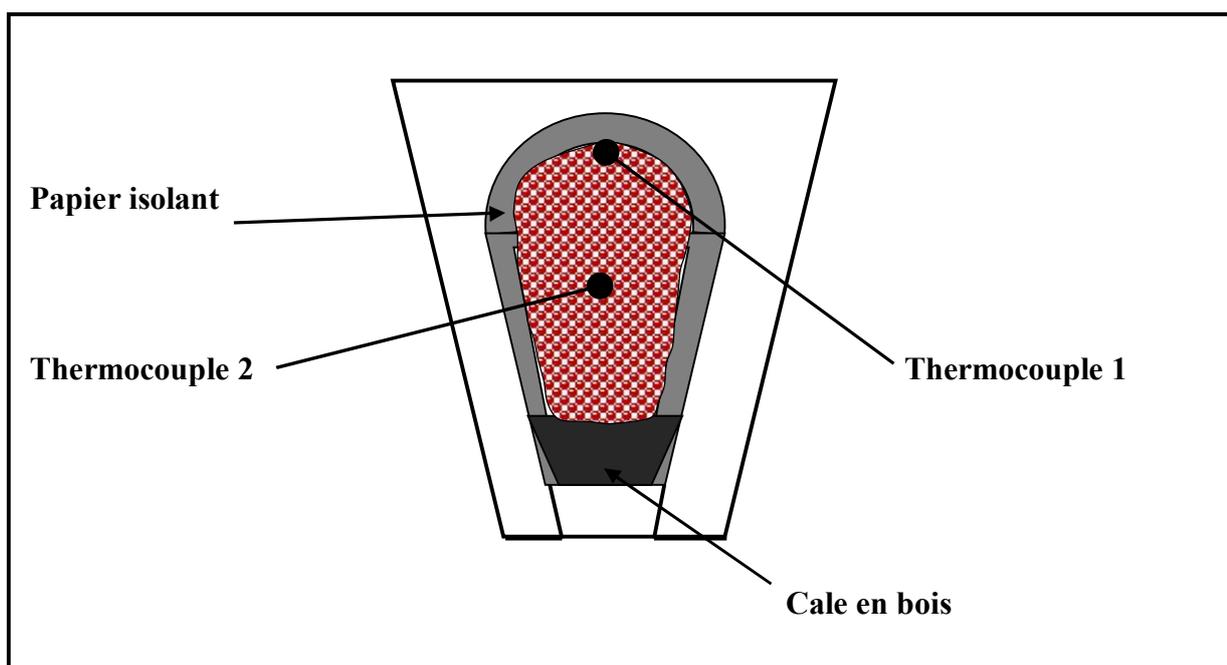


Fig IV-6 : Emplacement des thermocouples dans l'encoche.

- Après le montage des deux bobines et les trois capteurs on met dans le stator un rotor qui reste libre non fixe comme illustré sur la figure IV-7, pour se rapprocher des conditions de l'essai de la machine à l'arrêt. Car sans rotor, pour une tension de $V = 77V$ on aura un courant $I = 4.7A$ et une puissance absorbée, $P = 240W$.
- On branche la phase à l'autotransformateur utilisé comme source de tension variable.

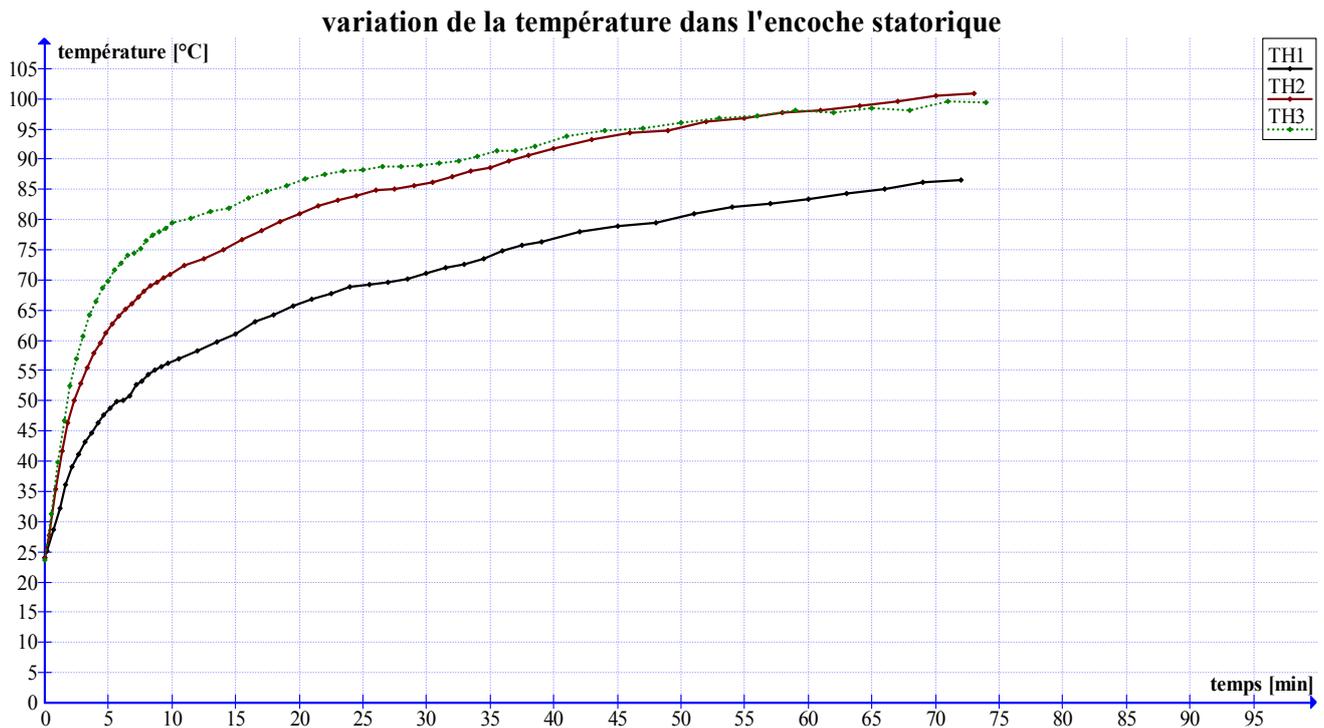


Fig. IV- 7 : photo des bobines, capteurs et un rotor dans le stator.

On alimente les bobine d'une phase par une tension $V = 78 \text{ V}$ avec un courant $I = 3 \text{ A}$, la puissance $P = 140 \text{ W}$, ces valeurs sont constantes pendant tout l'essai.

On relève les valeurs des températures des trois thermocouples, et les instants correspondants à ces valeurs.

On trace les courbes des températures par rapport au temps des trois capteurs, par suite ils sont comparés à celles de la courbe VI-2.

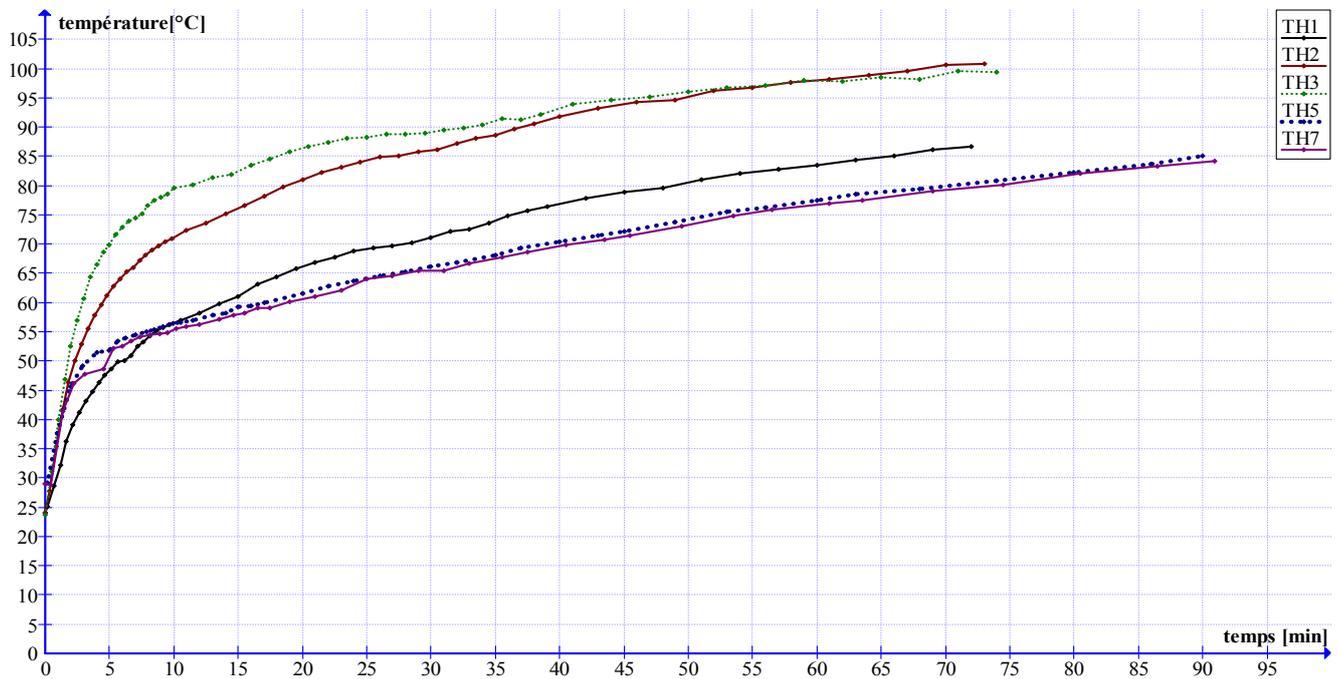


Courbe IV-3 : variations de la température dans l'encoche statorique et une tête de bobine.

V-8 Observations et interprétation des résultats.

- La température ambiante au labo le jour de l'essai est $T_a = 25.5^\circ\text{C}$, mais les capteurs affichent des valeurs de 24°C environ, avant l'alimentation des bobines. Car les thermocouples présentent une erreur avant l'échauffement des conducteurs du capteur.
- Au début de l'essai ; (de 0 à 30 min) la courbe TH3 présente un écart près de 5° par rapport à TH2, et de 10° par rapport à TH1 donc la température est plus élevée sur la tête de la bobine, car dans l'encoche une partie de la température est transférée par conduction dans le stator, mais sur la tête le transfert se fait uniquement par convection dans l'air.
- A partir de 30 minute les courbes de TH2 et TH3 ne présentent pas un écart important mais toutes les deux ont un écart de 14°C par rapport à la courbe de TH1. Cela peut se produire à cause de l'échauffement du stator avec le temps, par conduction thermique d'où les courbes de TH3 et TH2 sont presque les mêmes. Mais par rapport à la courbe de TH1, cet écart est résulte de fait que les pertes de chaleur sont plus important au milieu de l'encoche et sur les têtes de bobines qu'au fond de l'encoche.

V-9 : Comparaison des résultats de l'essai de la machine à l'arrêt et ceux du stator creu.



Courbe IV-4: Evolution des températures dans la machine d'étude et le stator creu.

- Les points de départs des courbes TH1, TH2 et TH3 sont à 24°C près, et celles de TH5 et TH7 à 29°C. Cette différence résulte de la température ambiante du labo le jour de l'essai, soit 27°C pour l'essai de la machine à l'arrêt, et 25.5°C pour l'essai du stator cru.
- les pertes dans l'essai du stator cru sont plus importantes que celles de la machine à l'arrêt et cela est dû à plusieurs facteurs :

1. la résistance des bobines du stator cru est : $R_s = 10,2\Omega$ et celle de la machine est : $R_m = 8,2\Omega$, donc les pertes par effet Joule de la bobine de stator sont plus importantes que les pertes Joule de la bobine de la machine.
2. la machine est fermée par une carcasse, et en présence des autres bobines ce qui rend le transfert de chaleur meilleur que celui de la bobine du stator ouvert.
3. Existence de Vernis sur le bobinage de la machine.
4. La différence entre la longueur du stator de la machine ($L_m = 110$ mm), et celle de stator d'essai ($L_s = 90$ mm), a pour effet, des pertes de chaleur plus importante dans les bobines du stator creu et un faible transfert de chaleur par rapport à la machine fermée.

V-10 Mesure de la température par une caméra infrarouge.

Pour voir comment mesurer la température avec une caméra infrarouge, on a pris une photo de stator à un instant connu.

La photo numéro est prise à la 73ème minute à partir du début de l'essai.

Comme la camera prend que des mesures surfaciques, alors on opte uniquement pour la mesure sur la tête de la bobine.

A ces instants le capteur TH3 affiche des valeurs au voisinage de 99°C, et la camera nous donne des valeurs de 95°C environ. Car le thermocouple est placé entre les fils de la bobine et la camera mesure que sur la surface.

Sur la fig. IV-8 suivantes on voit une photo prise par la caméra thermique, avec quelques curseurs et une échelle de lecture.

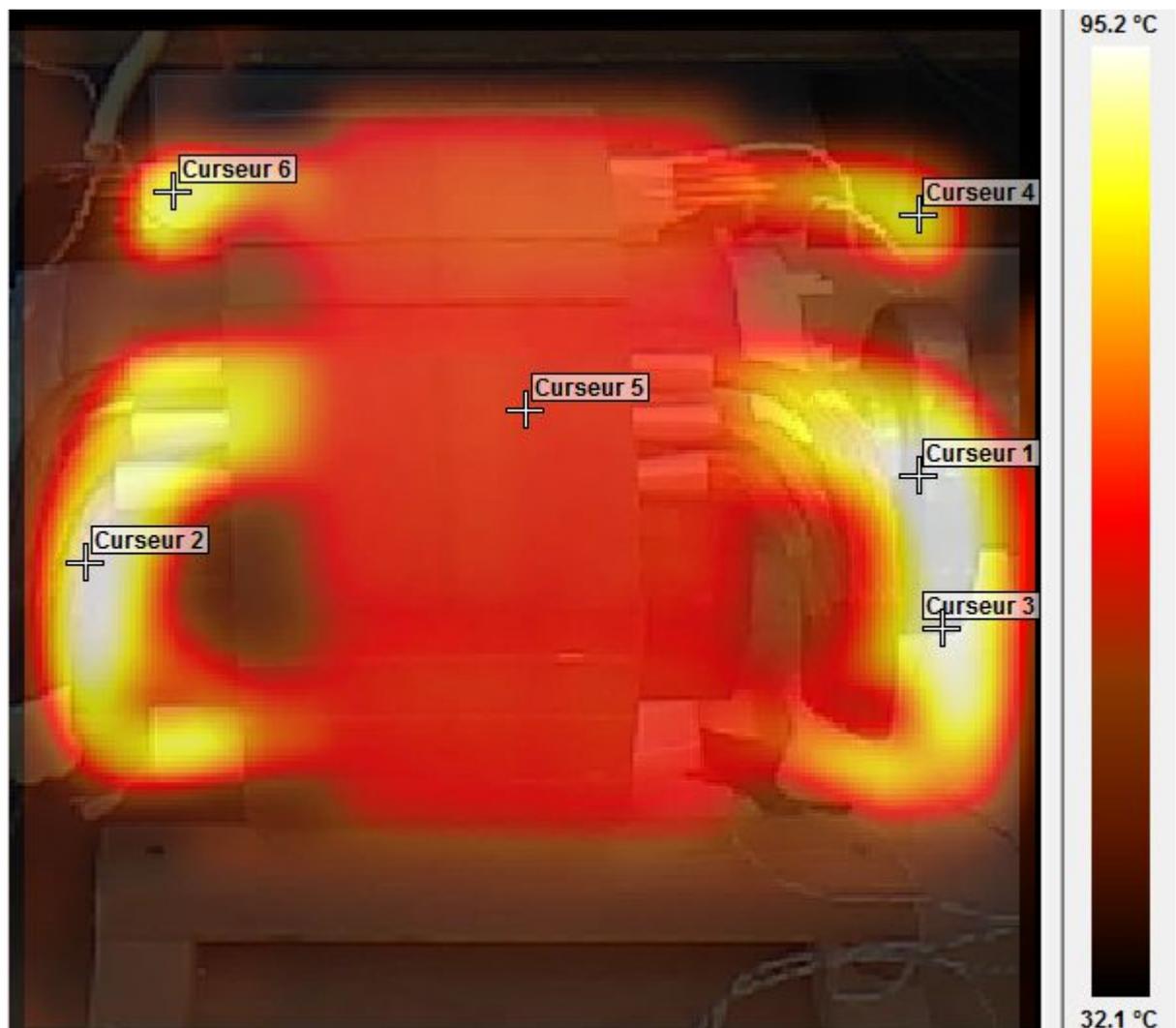


Fig.IV-8. Une photo du stator cru est les bobines prise par la caméra thermique.

Les lectures des curseurs indiquées par le logiciel de la camera sont :

- **Curseur 1** : 96.2°C
- **Curseur 2** : 94.7°C
- **Curseur 3** : 94.1°C
- **Curseur 4** : 76°C
- **Curseur 5** : 66.8°C
- **Curseur 6** : 87°C

V-11 Conclusion.

Dans ce chapitre on a présenté les essais expérimentaux, et des résultats obtenus.

Les différents résultats obtenus nous permettent de connaître le fonctionnement des capteurs et leurs utilisations, et bien sûr de voir et donner une image sur la répartition de la température dans le bobinage de la machine coté stator.

Les résultats des essais de la machine à l'arrêt et celui de stator cru, nous montrent que les pertes joule dans les machines électriques représentent le facteur le plus influant dans l'échauffement, et que la plus part des pertes statoriques sont localisées au niveau des enroulements statoriques.

Au niveau de l'encoche, l'échauffement est plus important au milieu qu'au fond de cette dernière. Mais reste plus important au niveau des têtes de bobines après une heure de fonctionnement. Cela peut être expliqué par la faiblesse du de transfert de chaleur autour des têtes de bobines vu qu'elles sont entourés d'air.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

L'étude de comportement thermique dans les machines électriques est très importante, elle présente actuellement un très grand intérêt, soit pour le constructeur ou pour l'utilisateur.

Notre travail est consacré aux relevés expérimentaux pour déterminer l'échauffement d'une machine asynchrone à cage au niveau de l'encoche statorique.

Pour une meilleure détermination de l'échauffement à ce niveau de la machine, nous avons opté pour la méthode de mesure par des thermocouples. Mais à cause de difficulté de leur emplacement dans l'encoche de stator de la machine, nous avons placé ces capteurs dans l'encoche d'un stator creu avec deux bobines qui représentent une phase dans la machine réelle.

Les résultats obtenus montrent que les pertes joule qui sont dues au passage du courant dans les bobines statorique représentent le facteur le plus influent sur l'échauffement de la machine électrique. Ils montrent aussi que l'élévation la plus importante des températures statoriques est observée au niveau des têtes de bobines.

Nous avons constaté que l'absence de la carcasse présente un effet négatif sur le refroidissement de la machine, et qu'il y a un échauffement excessif dans le cas où le rotor de la machine est bloqué.

Pour des utilisations en laboratoire à des fins de recherche, il est plus judicieux de placer les capteurs au cours de la fabrication de la machine, cela permet de les placer aux endroits jugés théoriquement les plus chauds. Est pour une étude plus complète.

Enfin, il est à noter que les résultats obtenus dans notre travail peuvent constituer la plate-forme, à laquelle un modèle thermique plus précis de la machine asynchrone peut être élaboré.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie.

- [1] : WIDED D, « conception et dimensionnement des machines asynchrones de petite moyenne puissance » thèse doctorat en science technique, école polytechnique fédérale de Lausanne, 2001.
- [2] : THEODORE WILDI, «Electrotechnique », Edition de Boeck Université, 8^{em} édition, 2000.
- [3] : M. LOURMANE, S. AOUDIA, N. BOUAMDA, «Etude et comparaison des différents modes de démarrage d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil». Mémoire DEUA, UMMTO, 2006.
- [4] : K. MEDANE, « mesure de la température dans le rotor d'une machine asynchrone à cage ». Mémoire de fin d'études, Master Professionnel, UMMTO, 2014.
- [5]: A. RAHEM., R. SARI, H. RABIA, « modélisation thermique d'un moteur asynchrone à cage avec la méthode de éléments finis ». Mémoire d'ingénieur, UMMTO, 2003.
- [6] : le moteur de recherche www.google.fr
- [7] : MOULAI ZAZI. D, « contribution à l'étude thermique des machines asynchrones alimentées par des convertisseurs électriques ». Mémoire de Magister UMMTO, 2002.
- [8] : M. BOUAM, M.BADJA, « mesure de la température statorique d'un moteur asynchrone triphasé à cage ». Mémoire, DEUA, UMMTO, 2008.
- [9] : J.OUIN, « transfert thermique ». Rappels de cours et applications, Edition Castilla, 1998.
- [10] : M. BELMKDAD, S.BERRAH, « étude expérimentale thermique d'un moteur asynchrone auto-ventilé ». Mémoire, Master électrotechnique, UMMTO, 2013.
- [11] : GEORGES. ASCH, « les capteurs en instrumentation industrielle ». Dunod, Paris, 1999.